



東京大学
素粒子物理国際研究センター
International Center for Elementary Particle Physics
The University of Tokyo



学部生向け特別セミナー

最先端「加速器素粒子実験」を知ろう！

CERN における国際協力加速器実験 **LHC-ATLAS 実験** の
スペシャリストである教員による連続特別セミナー&座談会

素粒子物理、物理実験の面白さ・難しさ、加速器実験、ビッグサイエンス、計測技術、
高速データ処理回路、データ解析、計算機科学、機械学習、量子コンピューティング等
の**ホットピック**を最前線で活躍する研究者から直接聞けるチャンスです。

学部生・大学院生・学内外問わず大歓迎

事前登録が必要です。素粒子物理国際センターのウェブページより詳細をご確認ください。

<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

日時：6月8日(月), 6月12日(金) 5限目 (16:50-18:35)

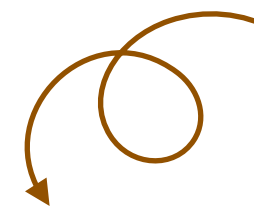
場所：オンラインでの開催となります。事前登録により接続方法の情報をお知らせします。

内容：

6月8日	「ヒッグス粒子の物理」	田中純一 (素粒子物理国際研究センター・教授)
	「超対称性粒子と暗黒物質」	澤田龍 (素粒子物理国際研究センター・准教授)
6月12日	「加速器・検出器の最先端技術」	石野雅也 (素粒子物理国際研究センター・教授)
	「LHC で探る余剰次元」	奥村恭幸 (素粒子物理国際研究センター・准教授)

自己紹介

ICEPPの現行実験のひとつ



→ 学部・修士は早稲田。学部4年生でMEG実験を始める。 (同研究室では暗黒物質探索も)

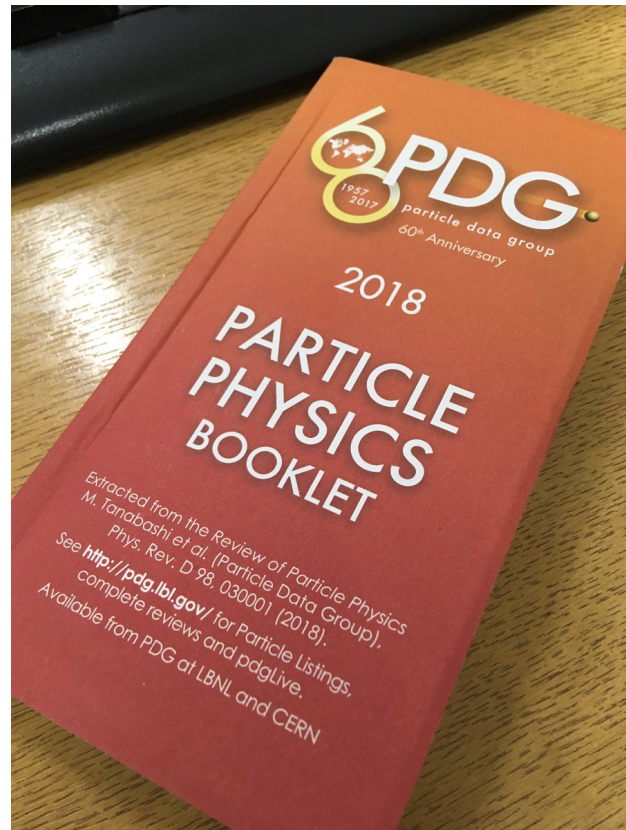
→ 博士で東大に入学し、MEG(最初のフル検出器データ)で博士論文

→ ポスドクもMEGで第1期実験の最終結果を出す

→ ATLAS (助教) に移って超対称性粒子探索 + コンピューティング

→ 現在: ATLAS (准教授) で引き続き超対称性粒子探索 + コンピューティング

ポスドクまでの仕事の成果



μ^- DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	p (MeV/c)	
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$	$\approx 100\%$		53	
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \gamma$	[d] $(6.0 \pm 0.5) \times 10^{-8}$		53	
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu e^+ e^-$	[e] $(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$		53	
Lepton/Family number (LF) violating modes				
$e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu$	LF [f] < 1.2	%	90%	53
$e^- \gamma$	LF < 4.2	$\times 10^{-13}$	90%	53
$e^- e^+ e^-$	LF < 1.0	$\times 10^{-12}$	90%	53
$e^- 2\gamma$	LF < 7.2	$\times 10^{-11}$	90%	53

物理研究について

高校や学部の授業からは、

”物理理論は完成されたもの”

という認識があるかもしれませんが、

物理の標準理論では説明できない現象 (暗黒物質の存在、物質優勢の宇宙) や、理論の不自然さがあるため、新しい物理があると研究者には思われています。

- 新しい物理の証拠を見つける (どんなモデルなのかのヒント)
- 暗黒物質の正体を探る

ことが基礎物理で最も重要なことだと思います。

素粒子物理の発展は技術の発展 (加速器、検出器、計算機)によって実現されているので、技術開発、**新しいことに挑戦**して生かしていくのが実験家としては大切だと思います。

個人的に実験が面白いと思うところ

- 最新結果を世界で一番最初に知れる
- 最新の技術(ハードウェア、ソフトウェア)を使える
 - それでも不十分なら自分で作る
- 頭の中で想像していたものが現実になる瞬間がある
 - 自分であれこれ考えて設計した装置が完成する
 - 長年準備した実験の最初のデータ
 - シミュレーションで予想した分布が(あれこれデバッグした後に)現れる
 - 十分精査しても、シミュレーションとあわなかったら、大発見、かもしれない。

ただし...

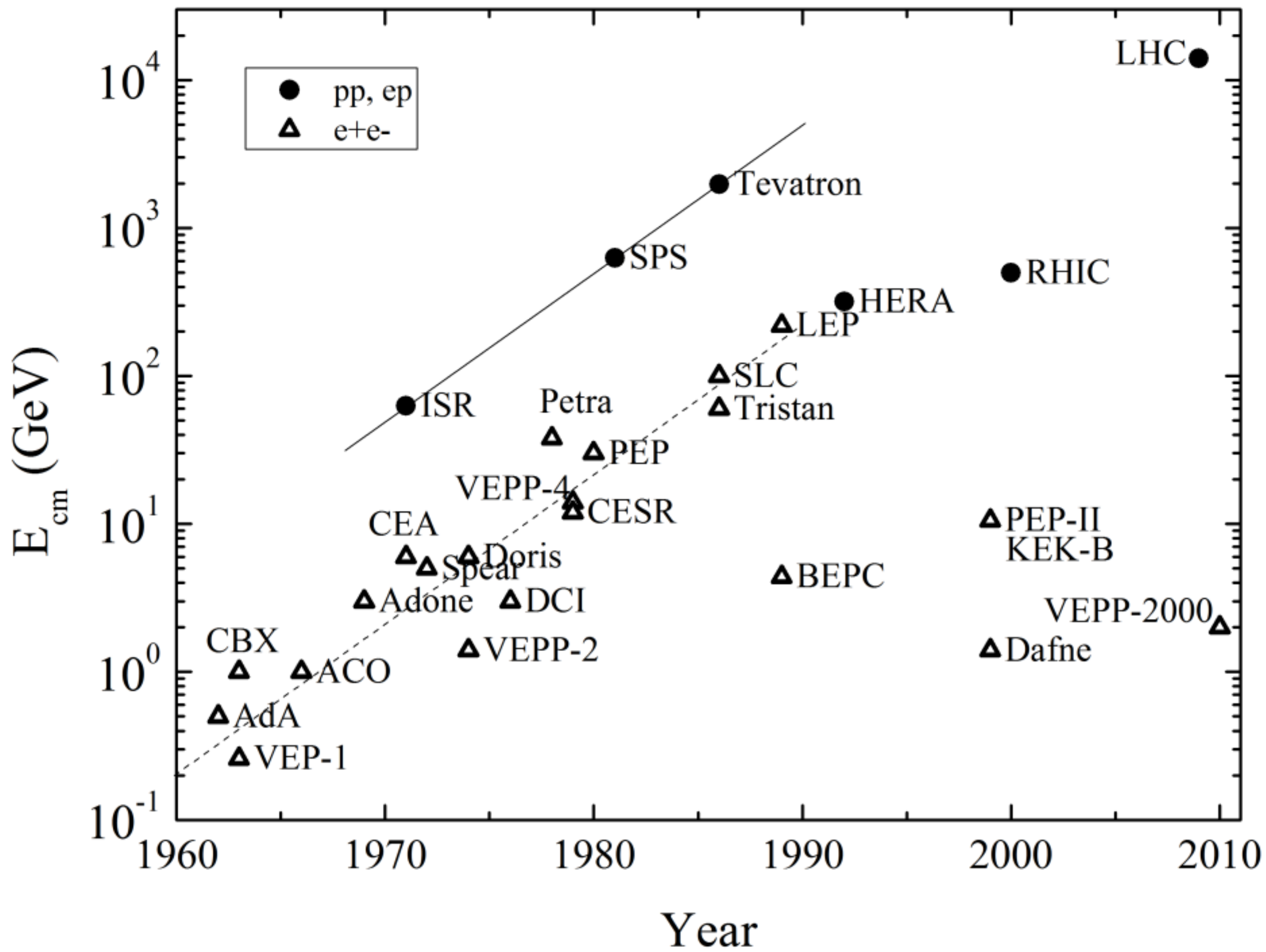
結果を出すためには、大変だったり面倒だったりする雑多のことは多いです

ATLASの良いところ

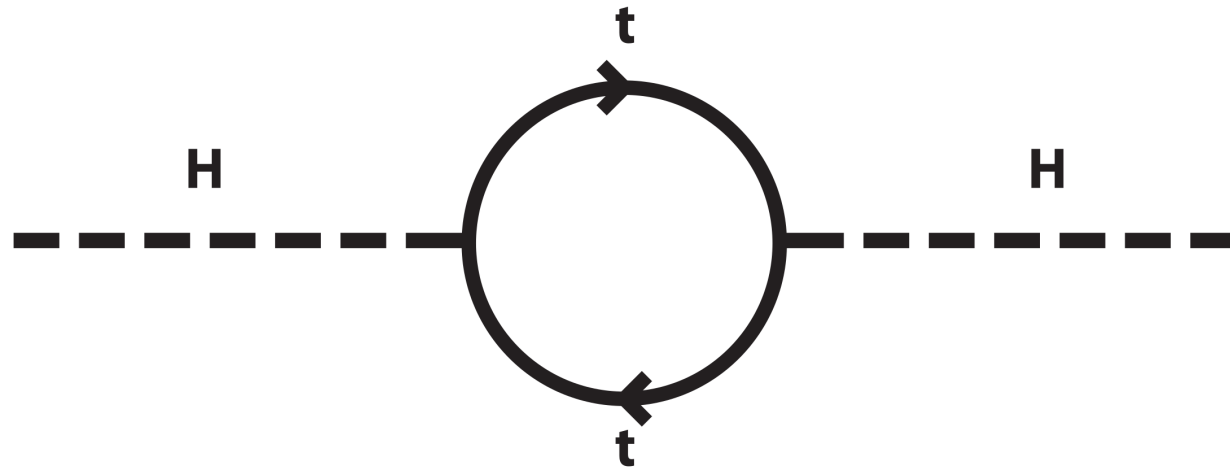
- **史上最高の衝突エネルギー**でTeV領域に直接アクセス可能な唯一のコライダー
- 同じデータで**色々な物理の研究**ができる
 - 新粒子を作って**直接探す** (限界は衝突エネルギーとPDFで決まる)
 - 標準理論の粒子(ヒッグス、トップクォーク...)を**精度よく測って**、新粒子の間接的な効果を探す。→ 高いエネルギースケールにアクセス可能
 - 様々な理論で予想される新粒子のうちどれを探すか、どうやって探すかを考えるのが楽しい。
 - 他の実験で今までとは違う探索をしようとする、新たな加速器や実験を作ったり、時間がかかることが多い。

ATLASの悪いところ

- (小実験のように)実験全部を自分で行うのは無理。
 - それでも、検出器一個の運転に参加 + D論で物理解析 はできます。
- 結果を出すまでの手続きに時間がかかる。(高い質の結果を公表するために必要なステップ)



標準理論と階層性問題



近くで見ると仮想的な(例えば)トップクォークが飛んで見かけの質量が大きくなる。(量子補正)

観測されるヒッグスの質量(125 GeV)

$$= \text{裸の質量} - \text{量子補正}$$



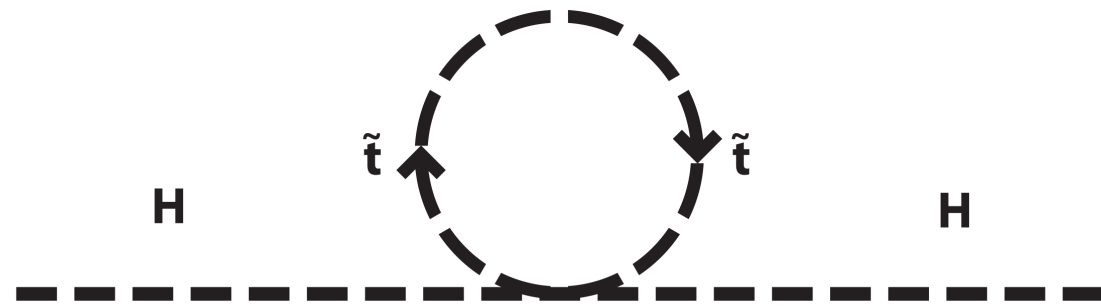
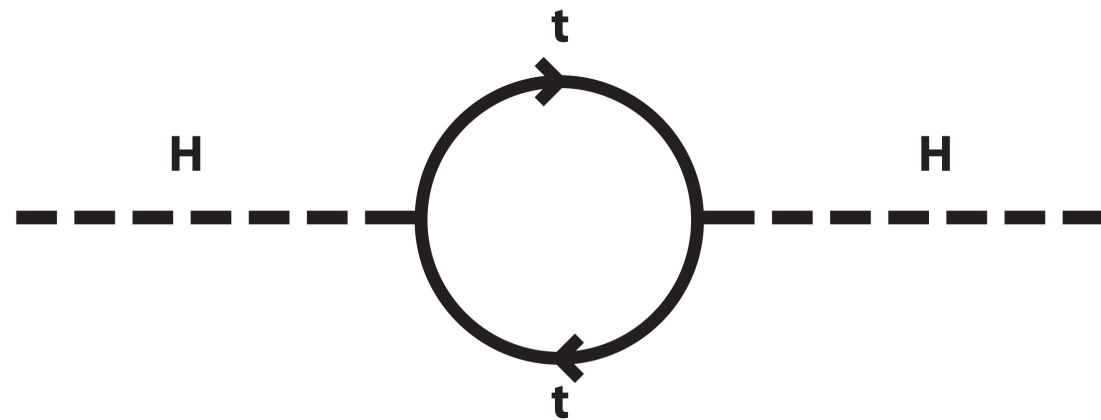
$\Lambda: 10^{15} - 10^{19} \text{ GeV} ?$

大きな補正の効果で、たまたま裸の質量がちょうど打ち消して、とても小さい (125 GeV) のヒッグス質量を実現している？

さすがに不自然。 → 何か理由 (標準理論を超えた理論) があるはず。

超対称性(SUSY)の導入

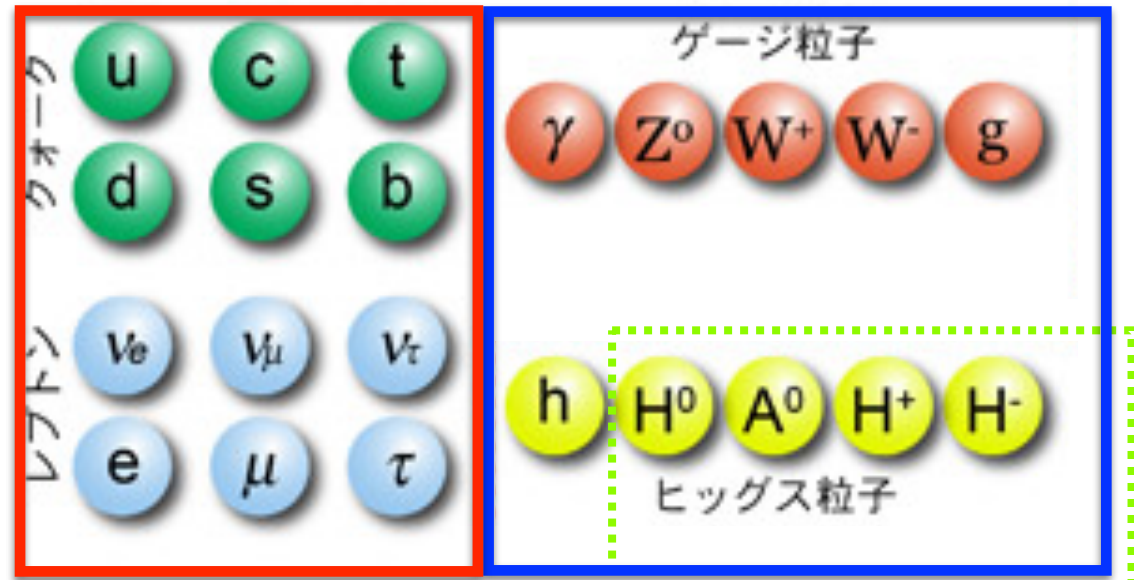
フェルミオンとボソンの間の対称性



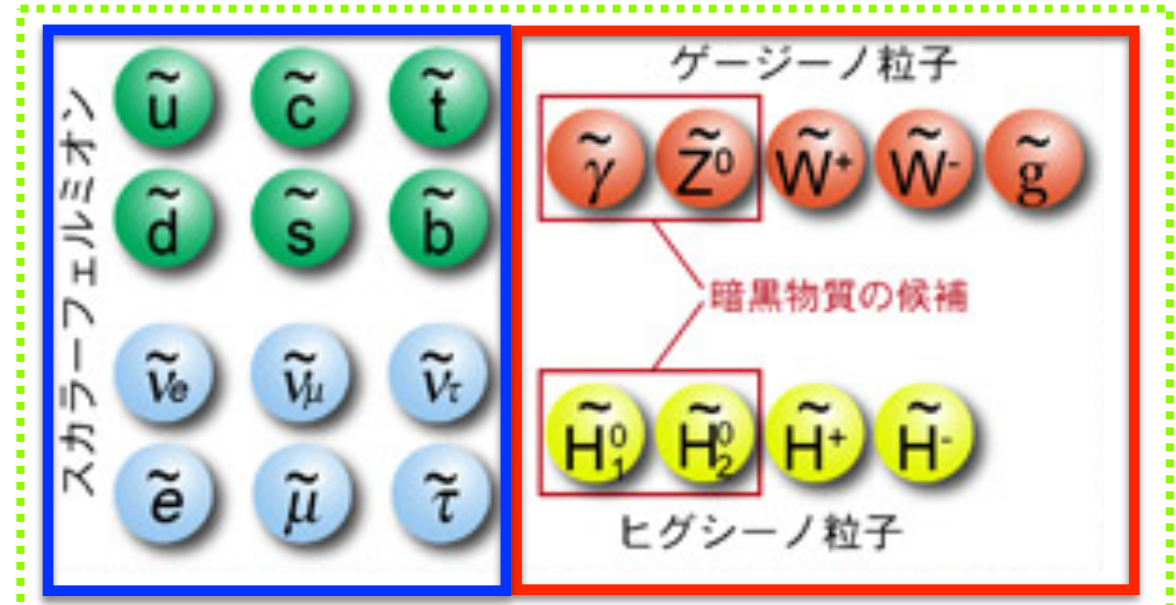
トップクォークと対になるボソンもあると、補正の効果がキャンセルされる。

対称性を導入すると粒子が現れる例
 スピン自由度に対する対称性 → SUSY粒子
 時間に対する対称性 → 反粒子 (時間に逆行)

フェルミオン 通常の粒子 ボソン



超対称性粒子



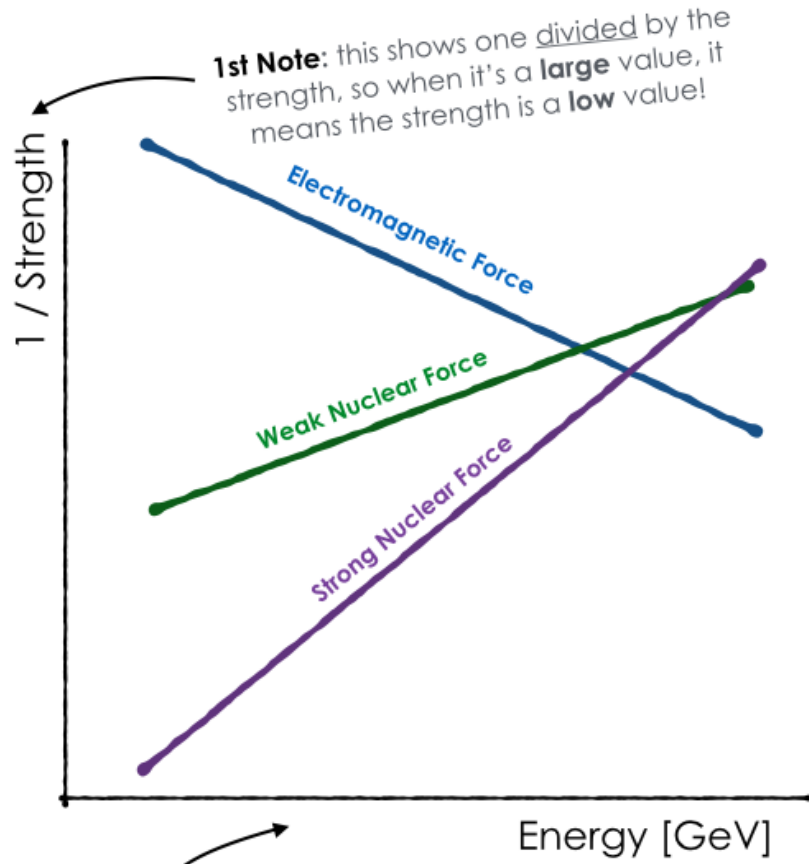
ボソン フェルミオン

絵:高エネルギー加速器研究機構

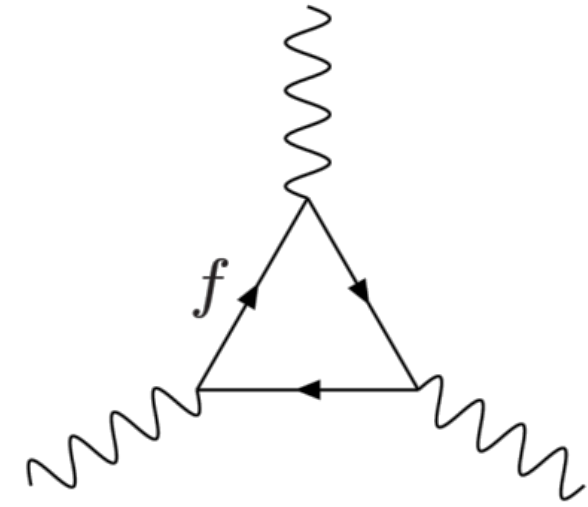
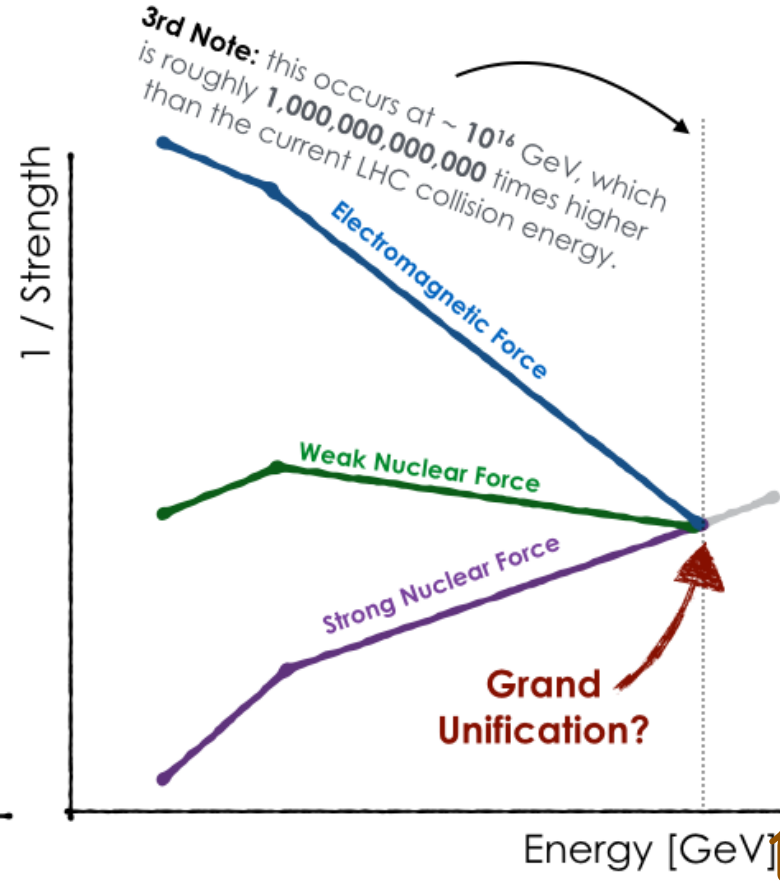
力の大統一

三角異常項があると繰り返し不可能(発散)
標準理論だと各世代の電荷の和が0になるので
問題ない。

標準理論



SUSY



$$3 \times \frac{2}{3} + 3 \times \left(-\frac{1}{3}\right) + 0 + (-1) = 0$$

↑ ↑ ↑ ↑

色 アップ ダウン ニュートリノ 電子

2nd Note: this is a log scale

Graphs are sketched out and approximate only (there are no scales anyway), but for more info you check see here:
https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/popular.html

超対称性を導入すると三つの力が統一する。

なぜ陽子と電子の電荷の大きさが同じなのかも説明できてしまう。

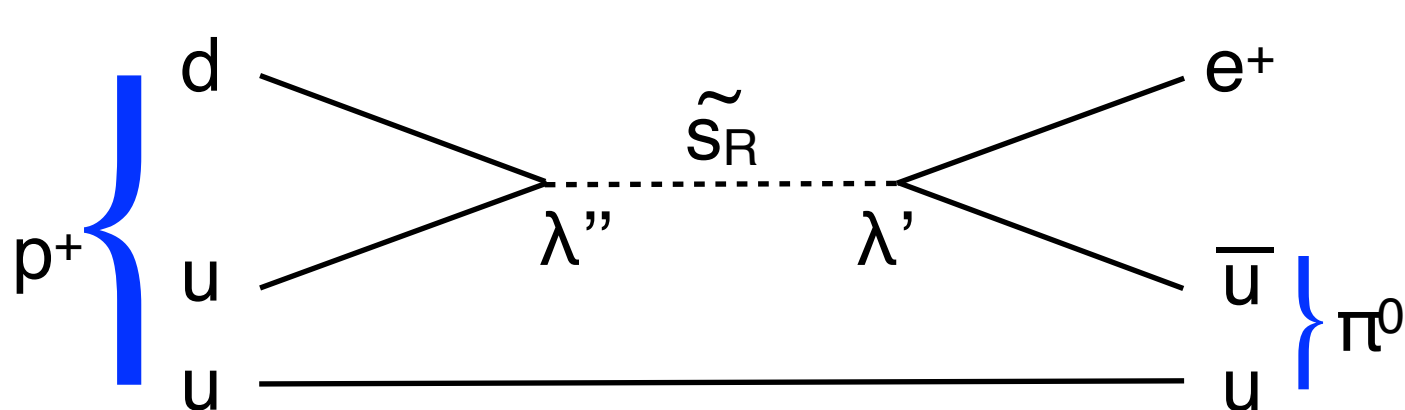
必然的、それとも偶然？
クォークとレプトンが同じ多重項？
→ 統一された多重項に結合する力として電弱相互作用と強い力を統一できる？

Rパリティの導入

単純に超対称性粒子を導入するだけだと、スカラーSUSY粒子と標準理論のフェルミイオンの間の湯川相互作用で、陽子崩壊やフレーバー非保存のレプトン崩壊($\mu \rightarrow e\gamma$)が起きて観測と矛盾する。

→ これを抑制するために、 $R = (-1)^{2S+3B-L}$ を導入。

標準理論粒子は $R=+1$, SUSY粒子は $R=-1$ となる。



Rパリティが保存する場合は λ' と λ'' は0になって、陽子崩壊を抑制できる。

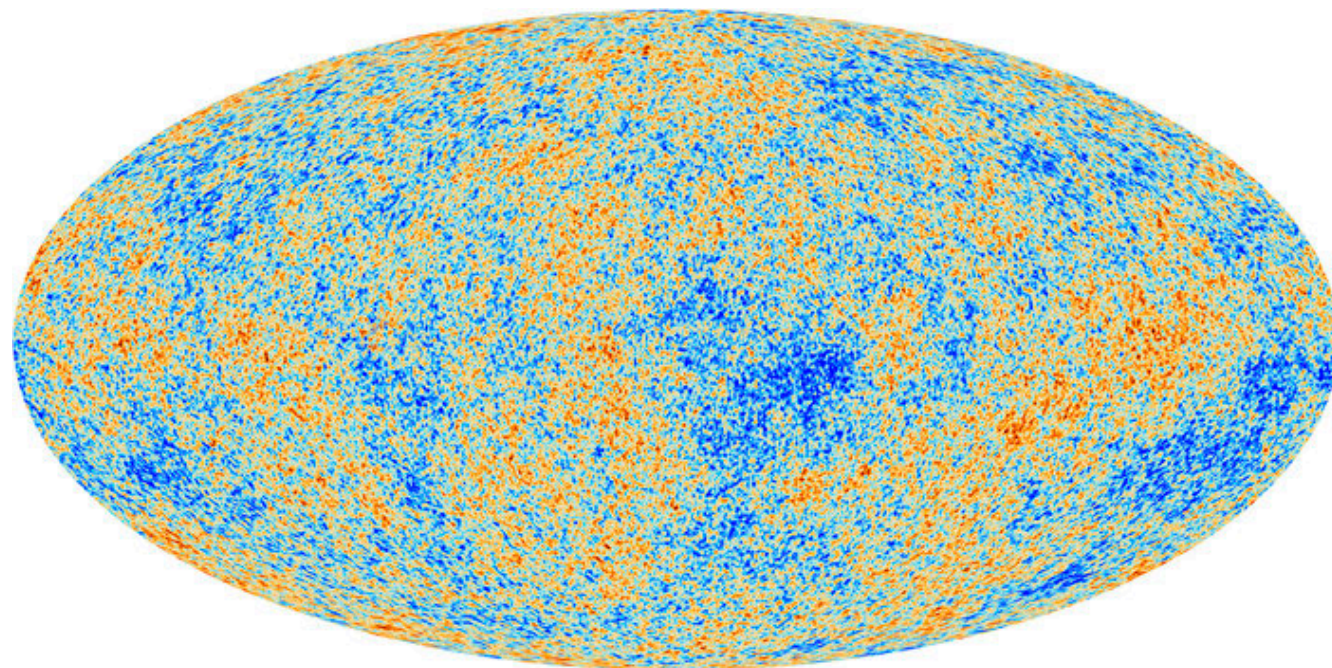
結果として、

- SUSY粒子がLHCでできる時には対生成される。
- もっとも軽い中性SUSY粒子は安定になる。 → **暗黒物質候補**

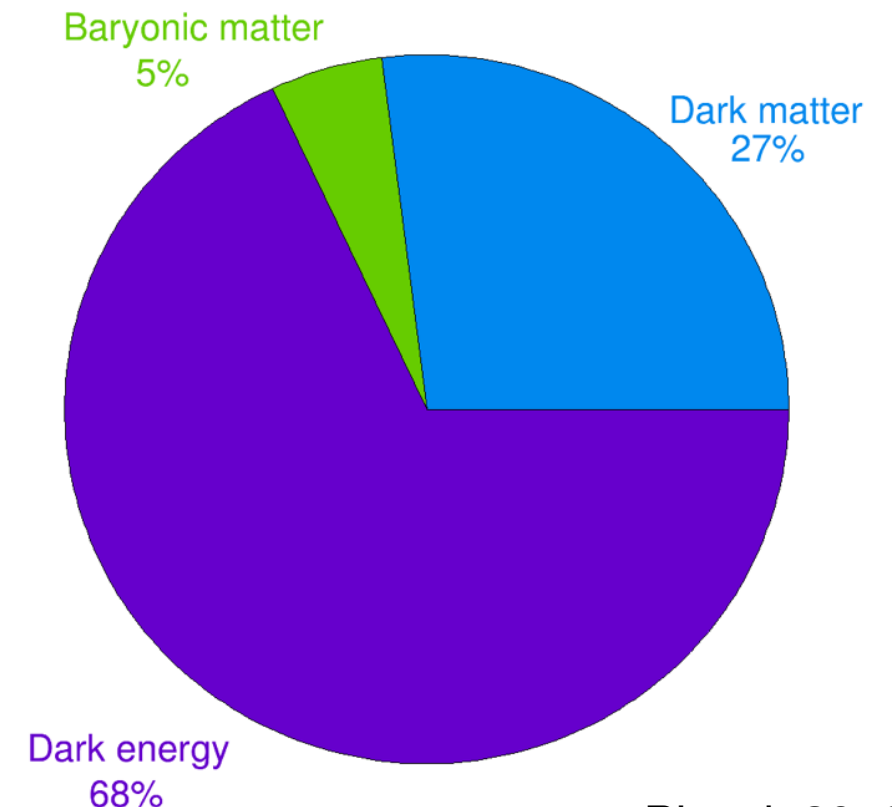
暗黒物質：ダークマター

1884年にはすでにケルビンが天の川銀河の星の速度分散から、大部分の質量は黒体である指摘。
1933年にツビッキーが銀河団中の銀河速度分散が、銀河数と明るさからの予想より大きすぎることから、ダークマターの存在を予想。

最新のプランク衛星による宇宙マイクロ波背景放射からダークマターは普通の物質の約5倍あることが分かっている。



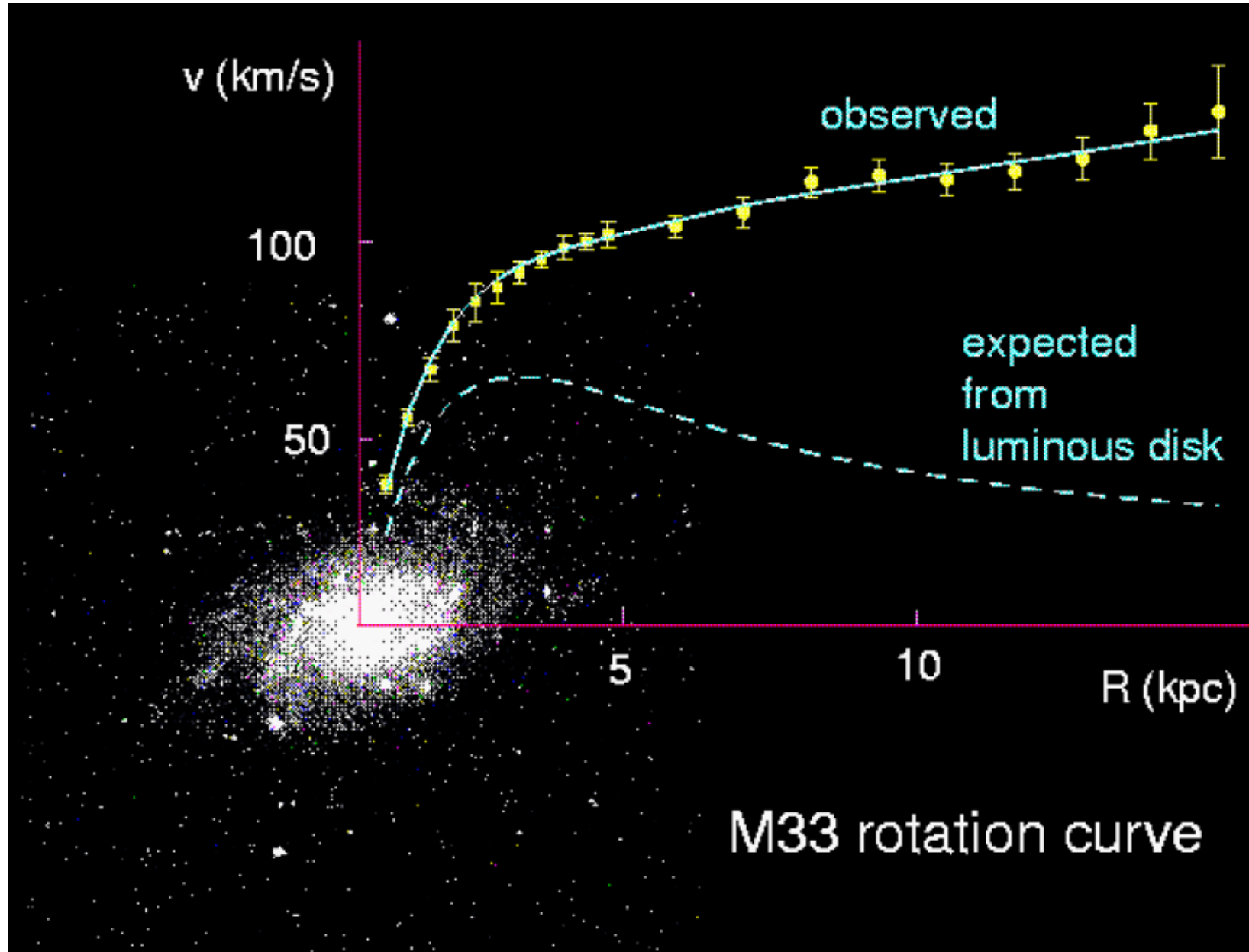
プランク衛星によるCMBマップ



Planck 2018

ダークマターの証拠

銀河の天体の速度が外に行くほど速い。
見えている物質だけだと説明できない。



$$v_{\text{rot}} = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

Vera Rubin 1970's



$M(r) \sim r$ のような物質があれば説明できる。

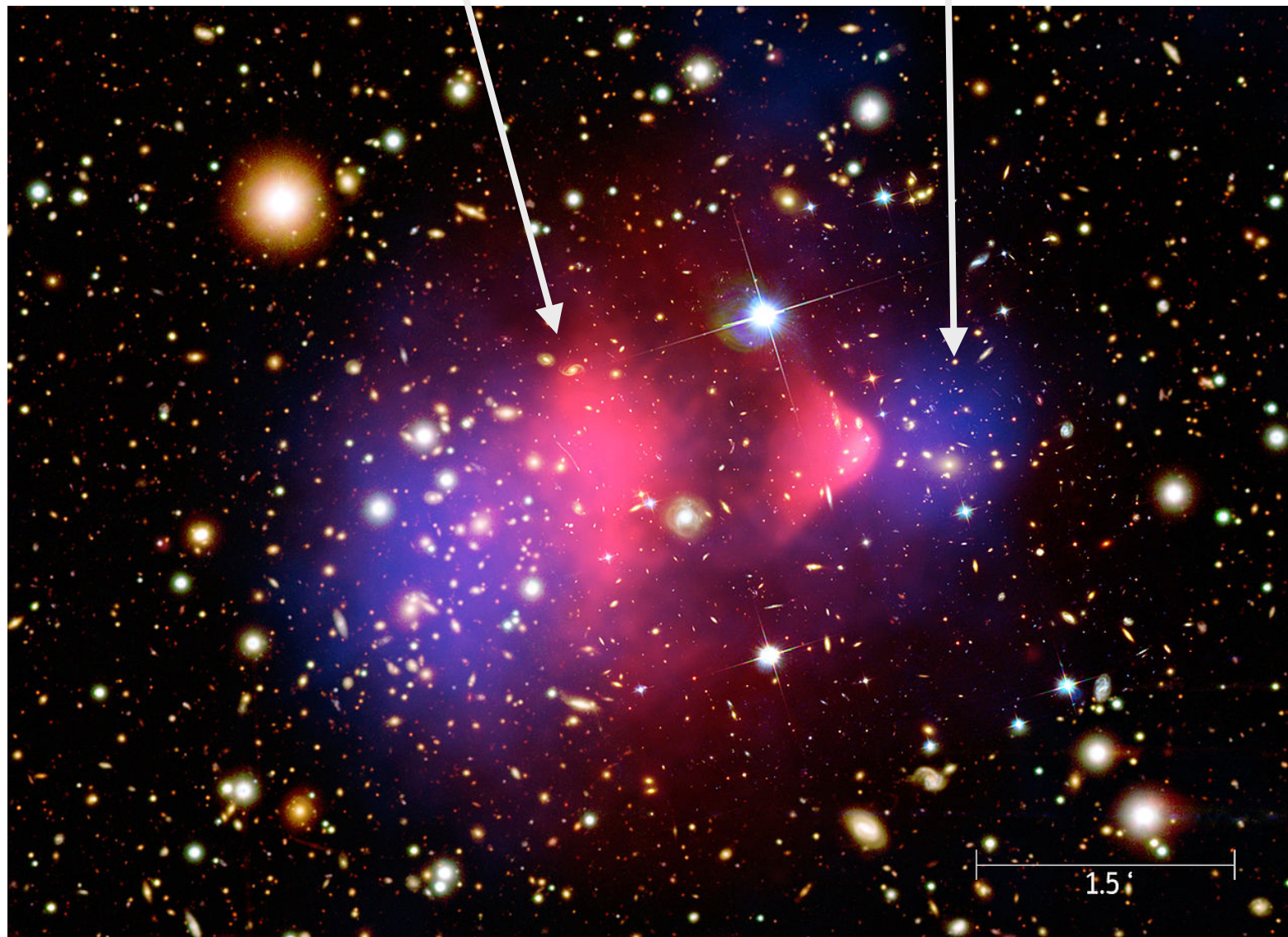
(他の天体から存在が予言された例: 海王星)

重力理論が間違っているだけでは？

距離が長くなると重力が予想よりも強くなる？

ガス

ダークマター



銀河団の衝突後の写真

(2004年4月、チャンドラ)

ガスの分布:

プラズマからのX線で場所がわかる
(銀河のハドロンの85%ぐらいはガス)

重力源 (ダークマター)の分布:

重力レンズからわかる

普通の物質の分布と重力源の分布がずれている

→ **重力理論の変更では説明できない。**

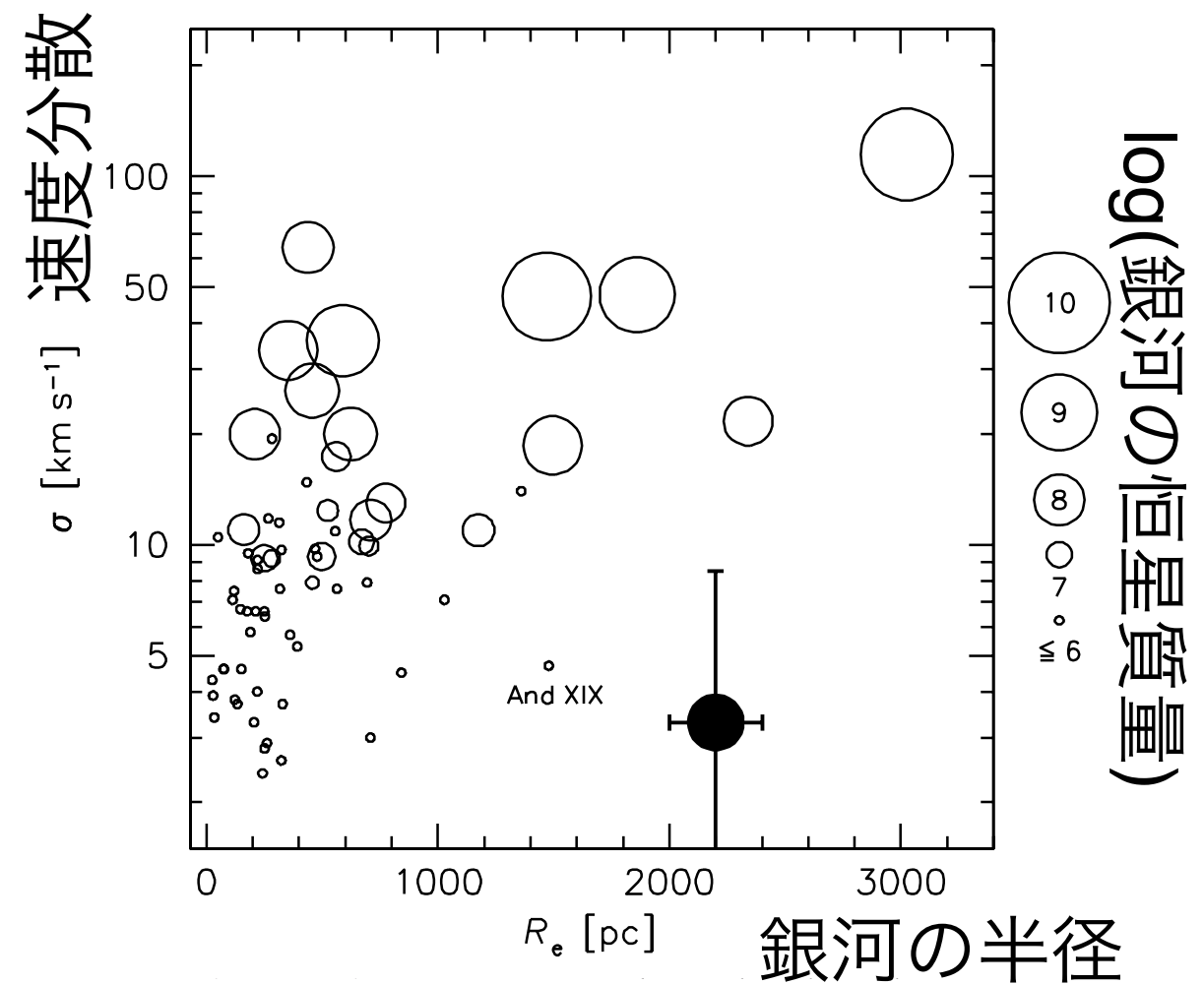
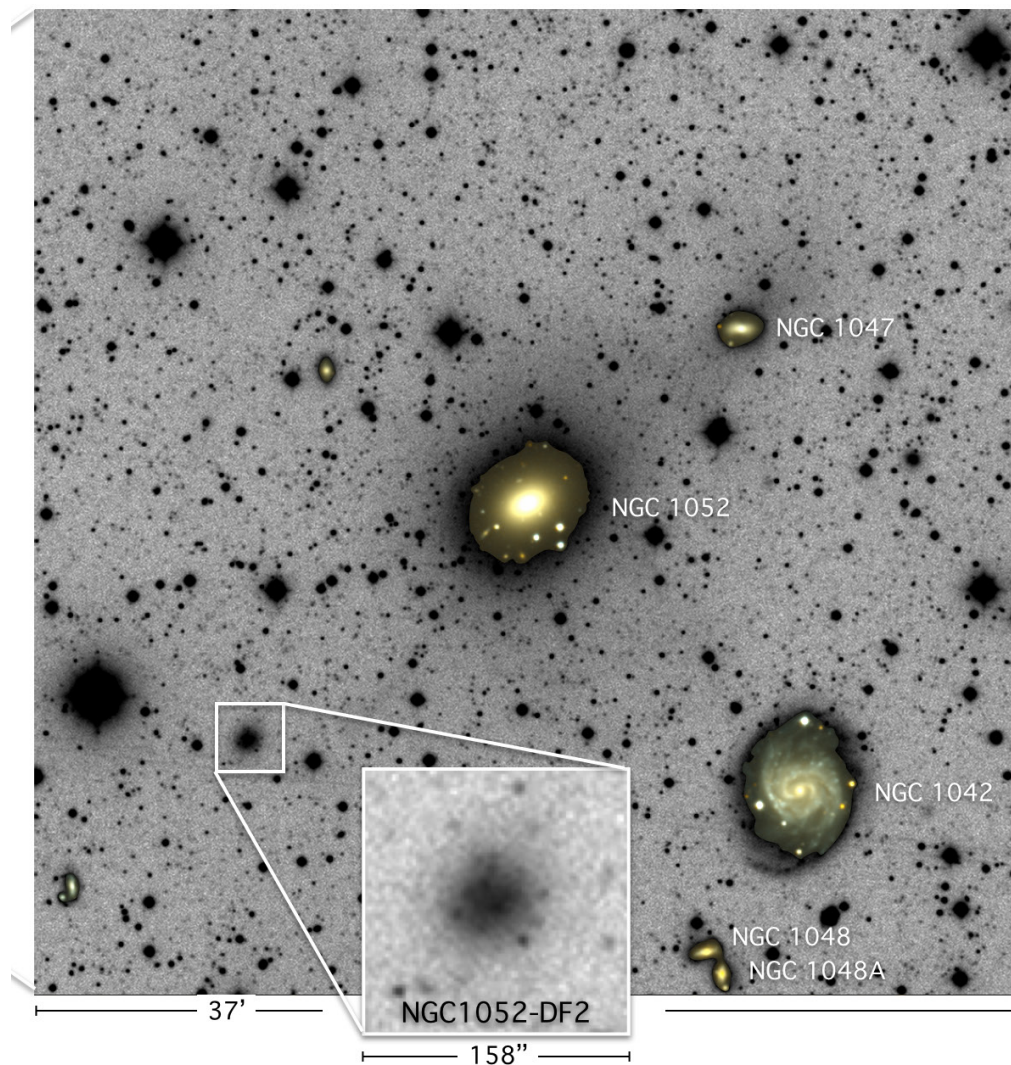
ダークマターがない銀河の発見

Nature 555, 629-632
(2018)

ダークマターが無い銀河の発見

→ ダークマターの含有量は銀河毎に違う。

→ (重力理論が宇宙で共通だとするなら) 重力理論の変更では説明つかない。

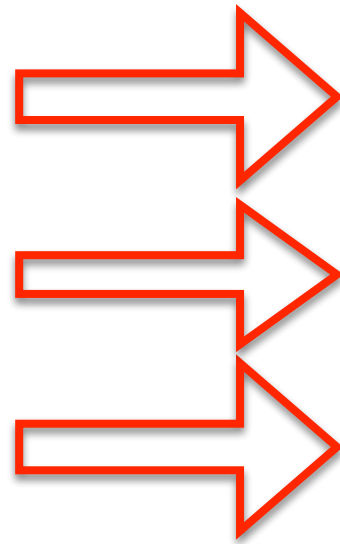


ダークマターがない銀河の発見が、ダークマターの存在の証拠！

ダークマター候補

- 知られている物質や粒子

- 光らない星
- 星間物質 (ガス)
- ニュートリノ
- 原始ブラックホール



宇宙の元素合成モデルと合わない

宇宙の大規模構造を説明できない

重力レンズの効果の観測に合わない

- 新粒子

- Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)
(e.g. SUSYニュートラリーノ)

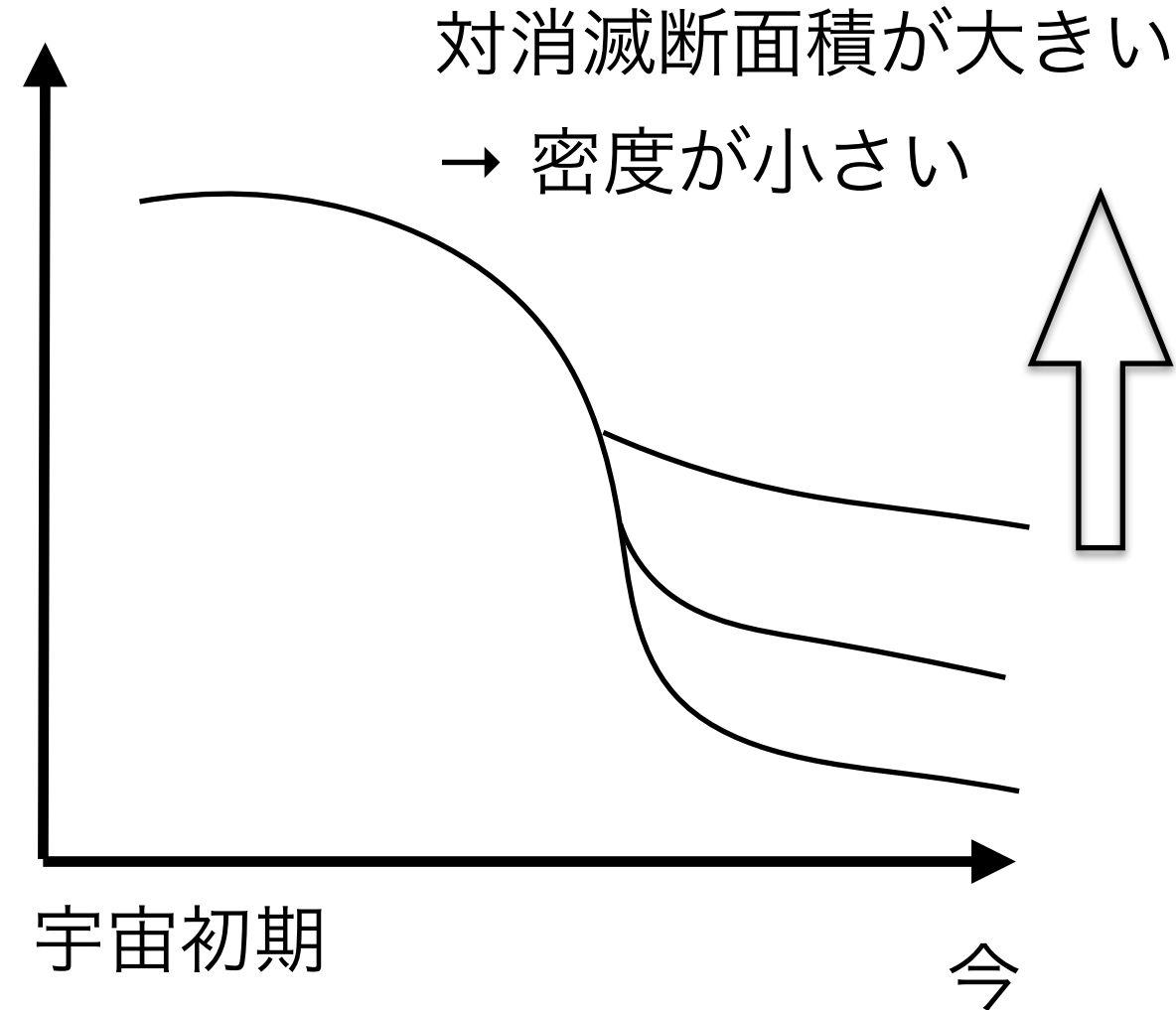
- アクシオン
- 重いニュートリノ
- ...

WIMP仮説

宇宙初期の高密度環境で対消滅していた
ダークマターが、密度が小さくなると対消滅の確率が下がって残っている。

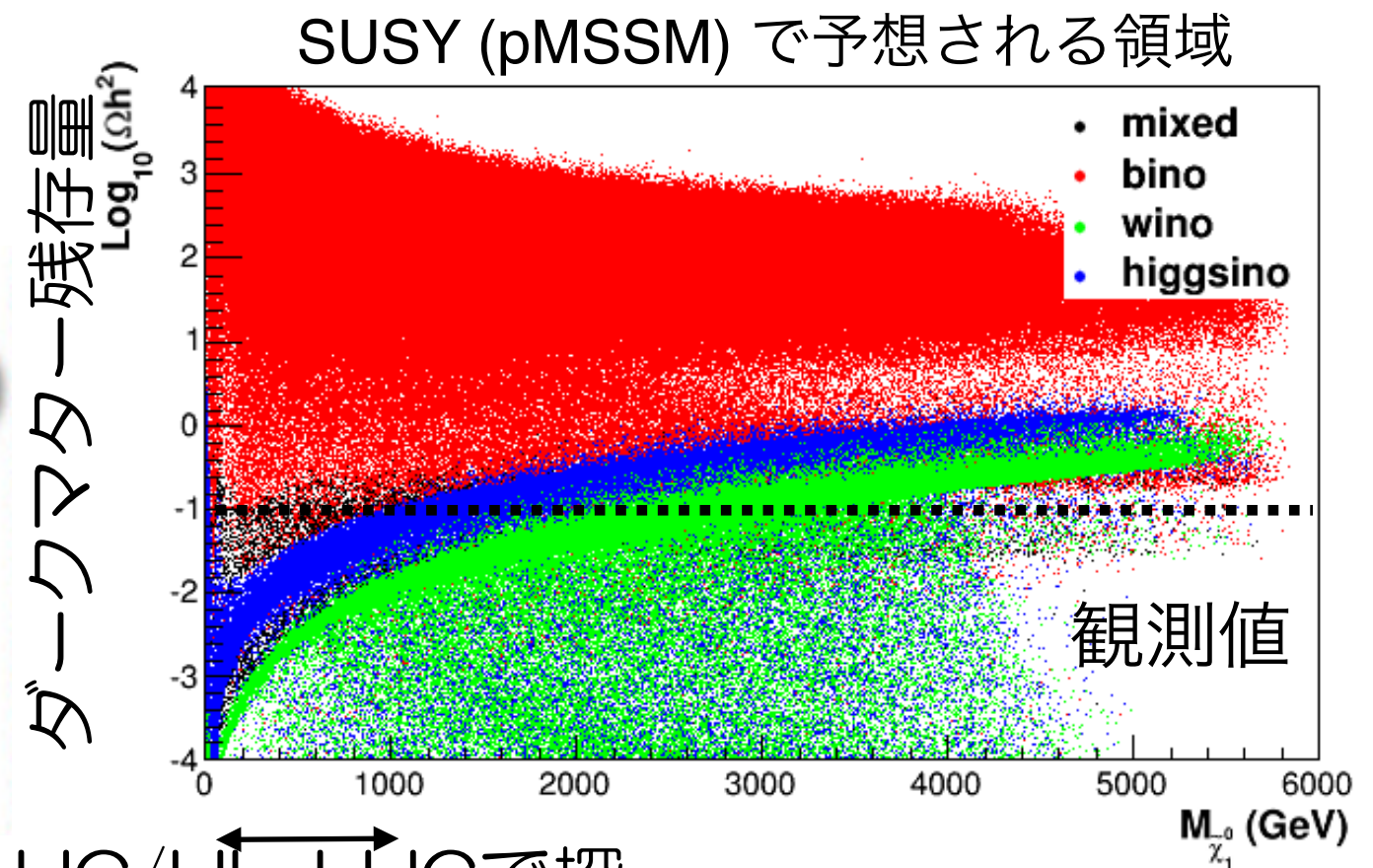
残存量から対消滅断面積は
 $\langle\sigma v\rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$

ダークマターの
個数密度



弱い相互作用をする質量 100 GeV – 10 TeV の粒子で説明できる。
SUSYのニュートラリーノがまさにこれに該当する。

ニュートラリーノ



ニュートラリーノ:

中性の強い相互作用をしないフェルミオンSUSY粒子

ビーノ: 対消滅断面積が小さいので、ダークマターが残りすぎる

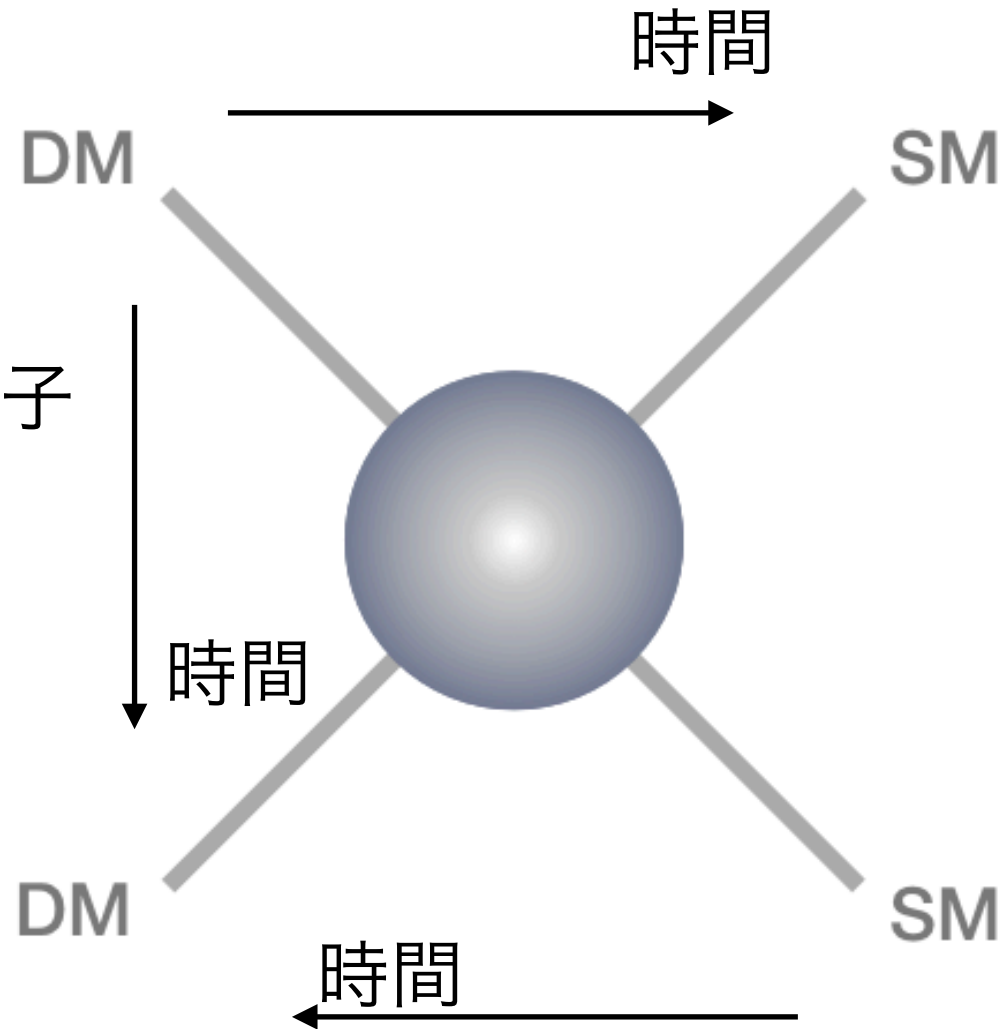
ウィーノとヒッグシーノ: 観測された残存量を実現できる。ダークマター全部がこれの場合の質量はそれぞれ**3TeV** (ウィーノ), **1TeV** (ヒッグシーノ)と予想される。他のもの(アクシオン等)もある場合はこれよりも軽くなる。

TeV領域のダークマターをLHCで作れる?

ダークマターの探し方

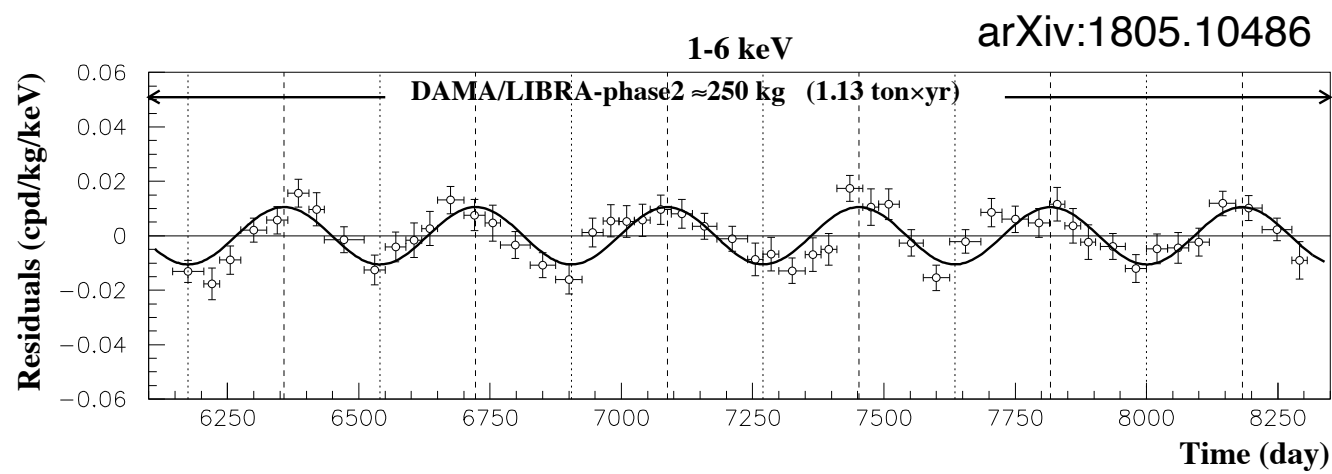
ダークマターの対消滅で発生する標準理論粒子(反粒子の超過)を探す。(間接探索)

ダークマターが標準理論粒子を反跳する事象を探す。
(直接探索)

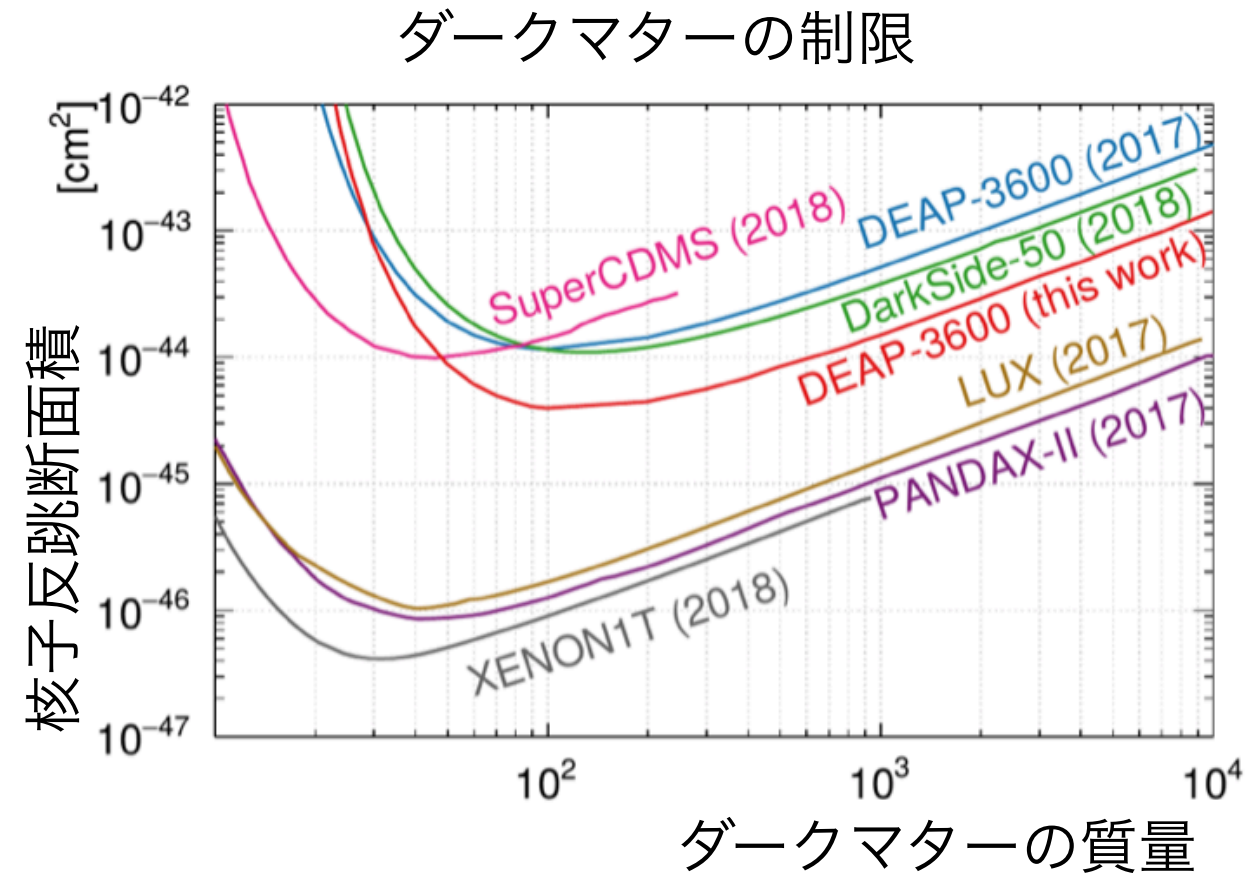


標準理論粒子からダークマターを作る(LHC)

直接探索



DAMA/LIBRAでは信号の年周期 (2010-2017年データ) がはっきり見えているが、他の実験では確認されていない。



- ダークマターが地球の周りにも平均的に分布していると仮定すると、 $O(100\text{GeV})$ のダークマターが 6×10^4 個/cm²/sec通過している。
- 液体キセノンやNaI等の検出器を地下において、反跳される信号を探す。
 - 質量が軽い方は検出器の観測閾値のため、重い方は通過する個数が少ないため感度が悪い。
 - 軽いダークマター探索(低いエネルギー閾値)や、方向に感度にある検出器などの研究も盛んに行われている。
 - 重い方も検出器の大型化で感度が上がっている。

間接探索

国際宇宙ステーション等の衛星搭載実験、地下や水中に設置したニュートリノ検出器、地上の望遠鏡ペアレー

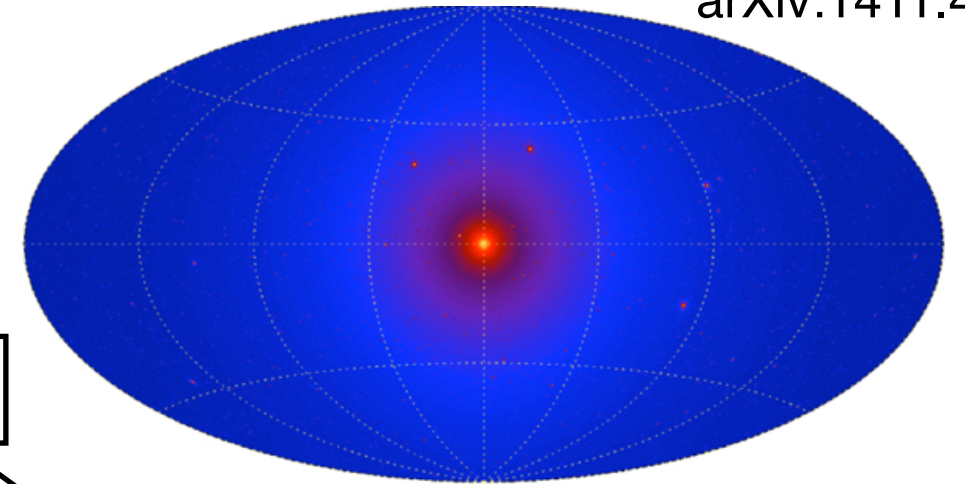
方法: ダークマターの対消滅からの反粒子、ガンマ線、ニュートリノ等の検出。

(宇宙線の生成や輸送、ダークマター分布に不定性が難点)

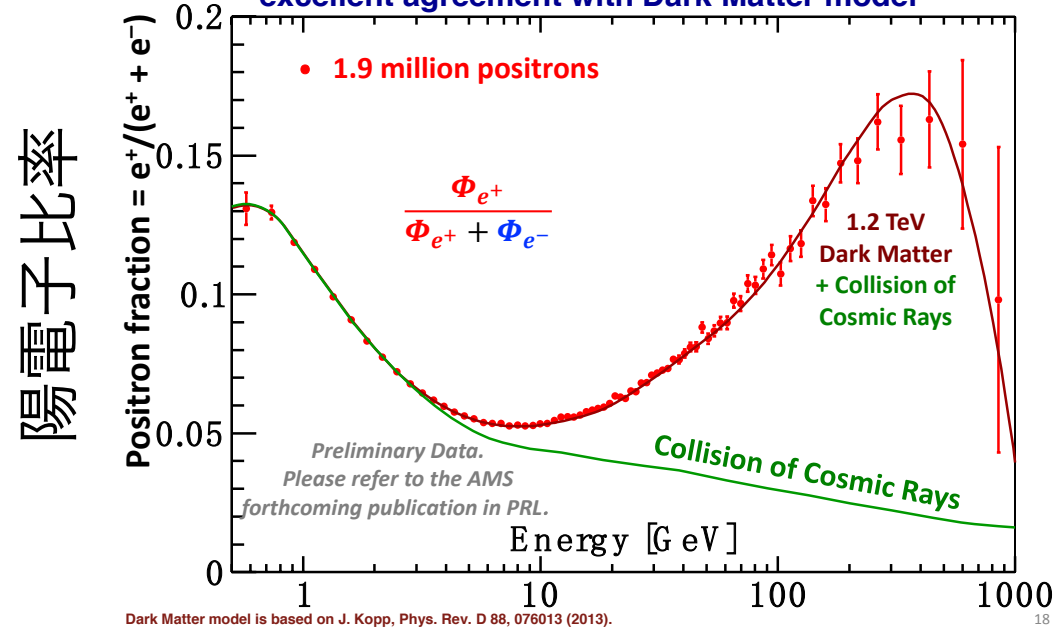
AMS実験が観測した陽電子の超過。
1.2 TeVのダークマターと合いがいい。

Fermi/LAT実験が観測したγ線の超過。

arXiv:1411.4647

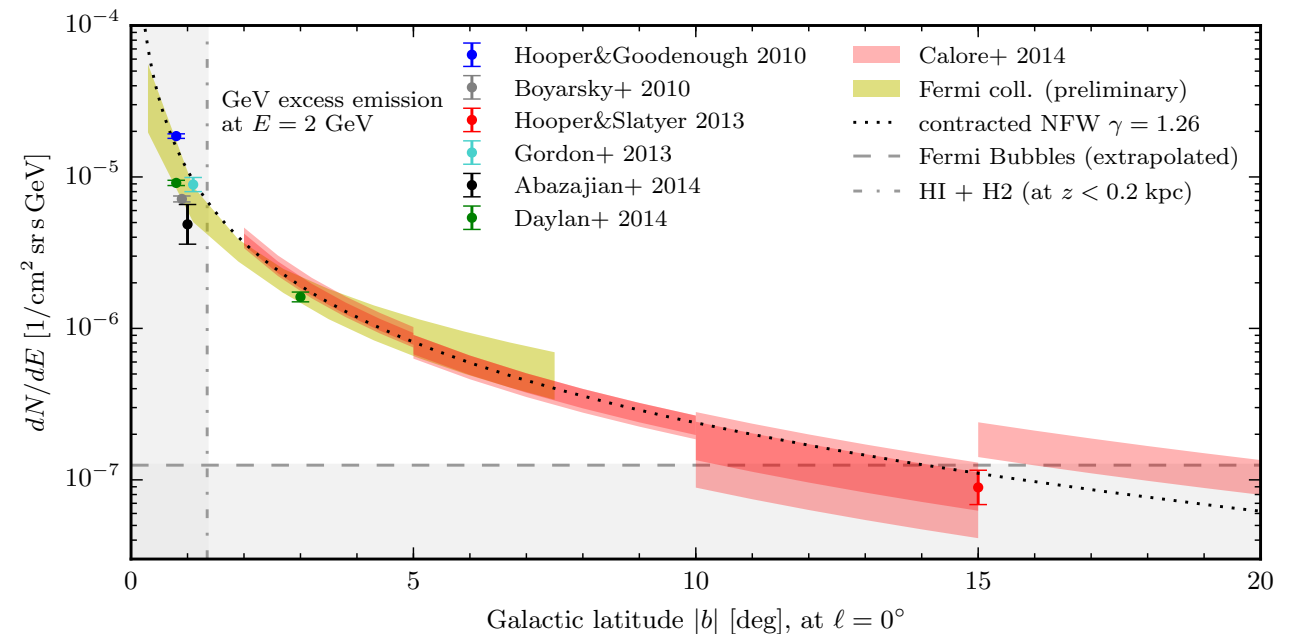


Latest AMS Positron fraction results appears to be in excellent agreement with Dark Matter model



エネルギー [GeV]

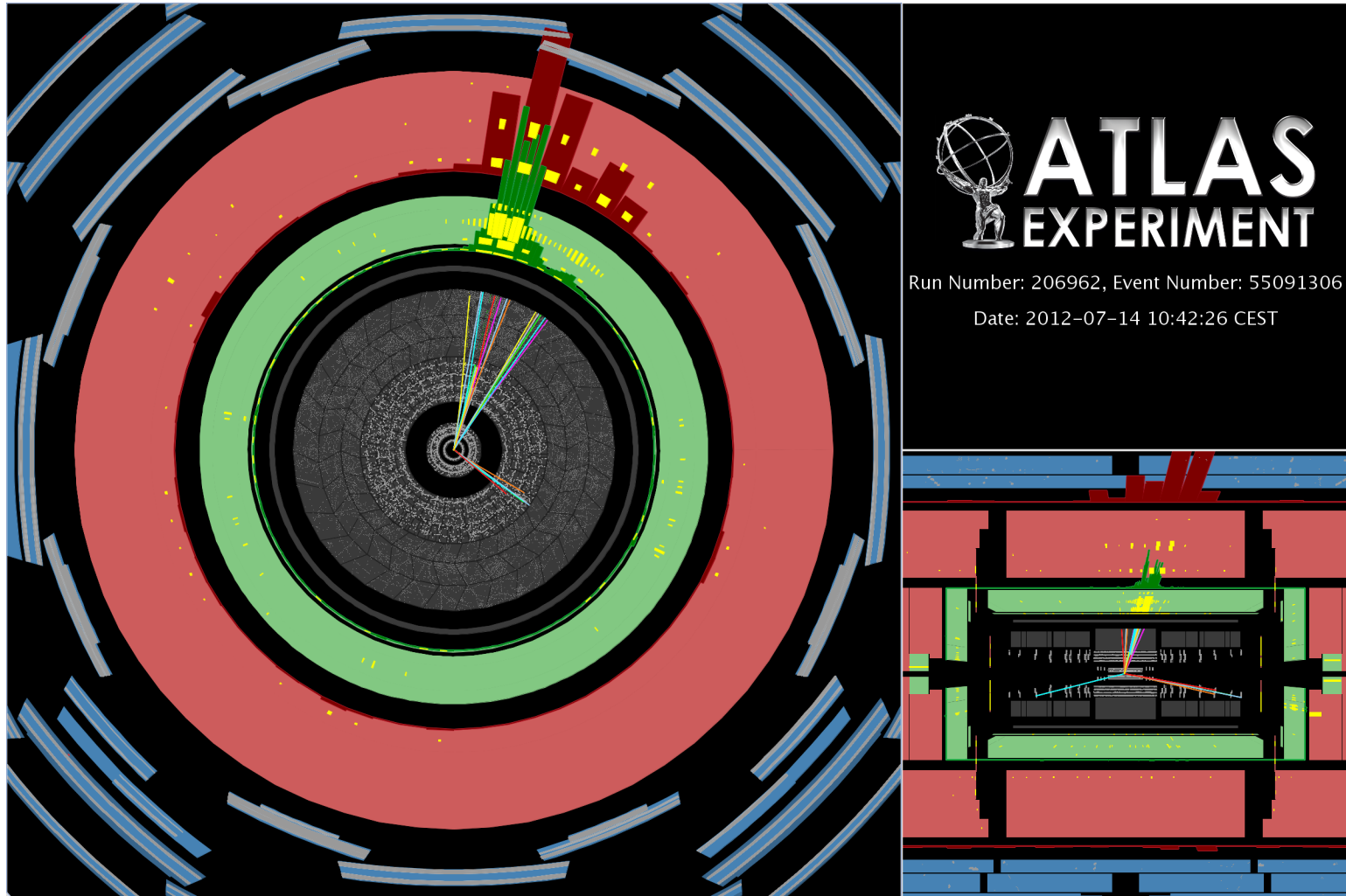
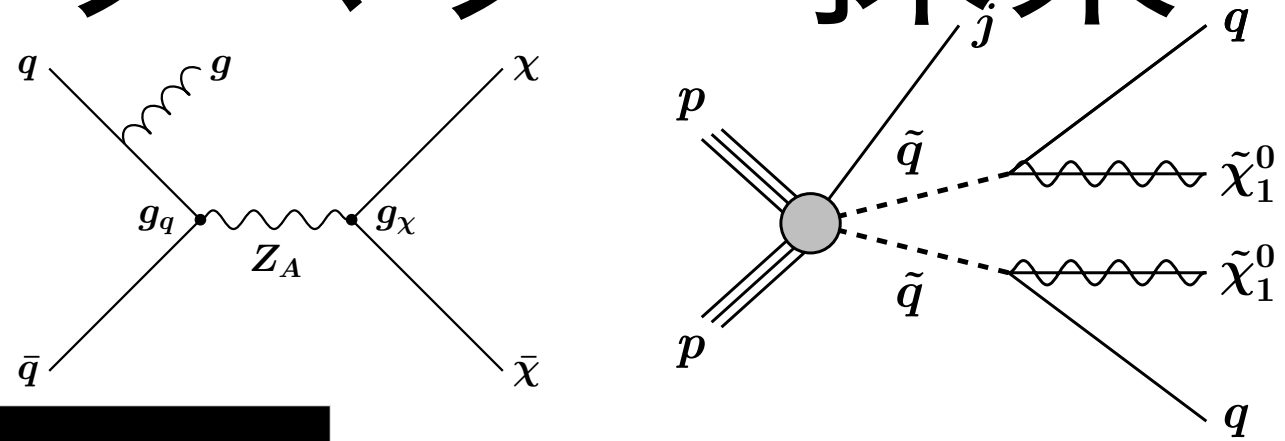
γ線の超過



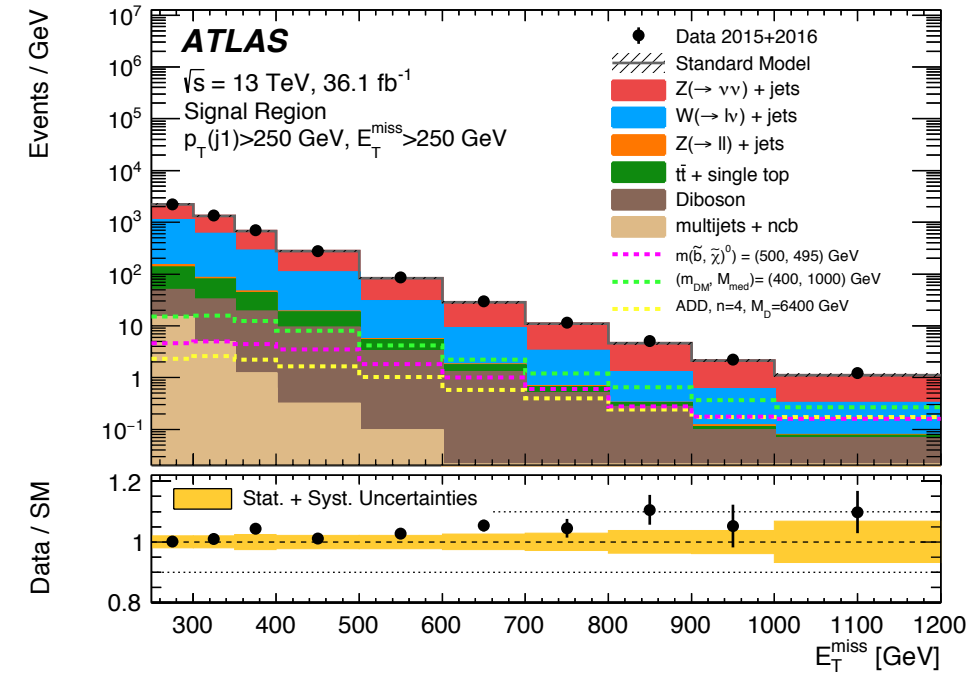
銀河中心からの距離

典型的な LHCでのダークマター探索

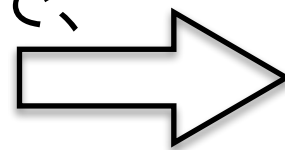
高い消失運動量とジェットを持つ事象の超過を探す。



消失横運動量分布



衝突前の陽子ビームは横運動量を持たないので、衝突後の横運動量の総和は0になるはず。

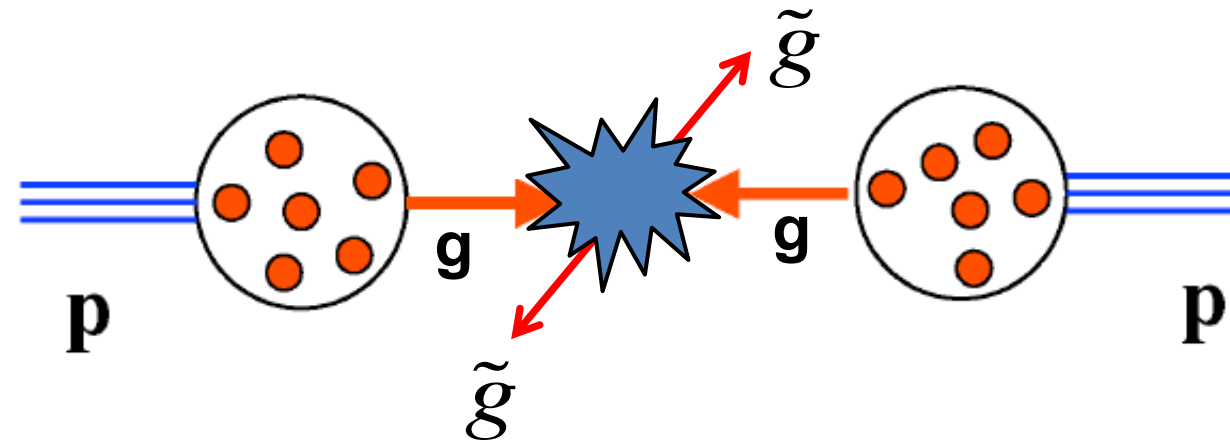


見えない粒子の横運動の和を計算できる。

LHCでの超対称粒子生成

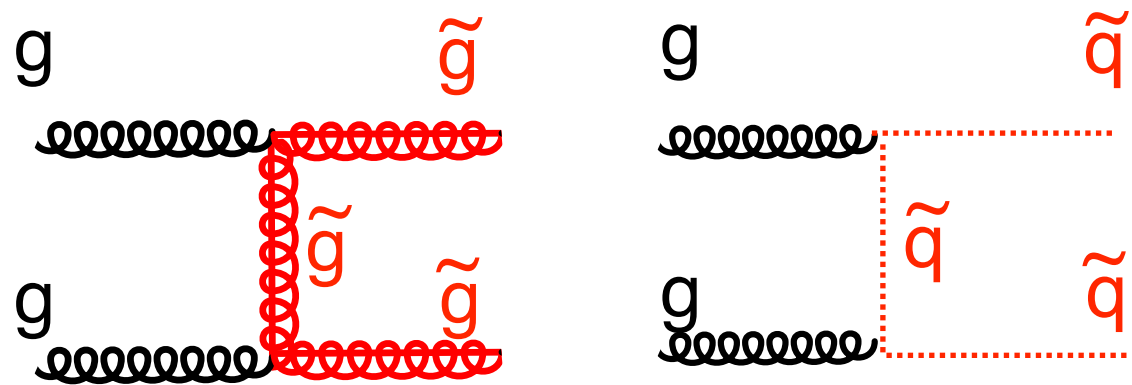
一番軽い中性SUSY粒子はダークマター候補

→ ほとんど全てのSUSY探索はダークマター探しと言える

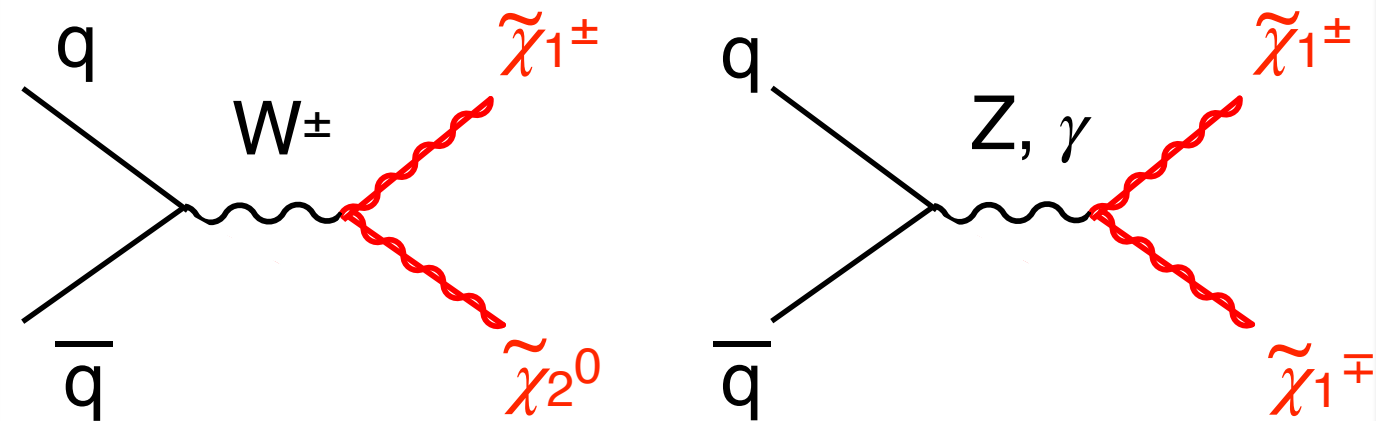


ここに示したのは代表的なダイアグラムのみ。
他のチャンネルもある。

スクォーク、グルイーノ生成



ゲージーノ、ヒッグシーノ生成



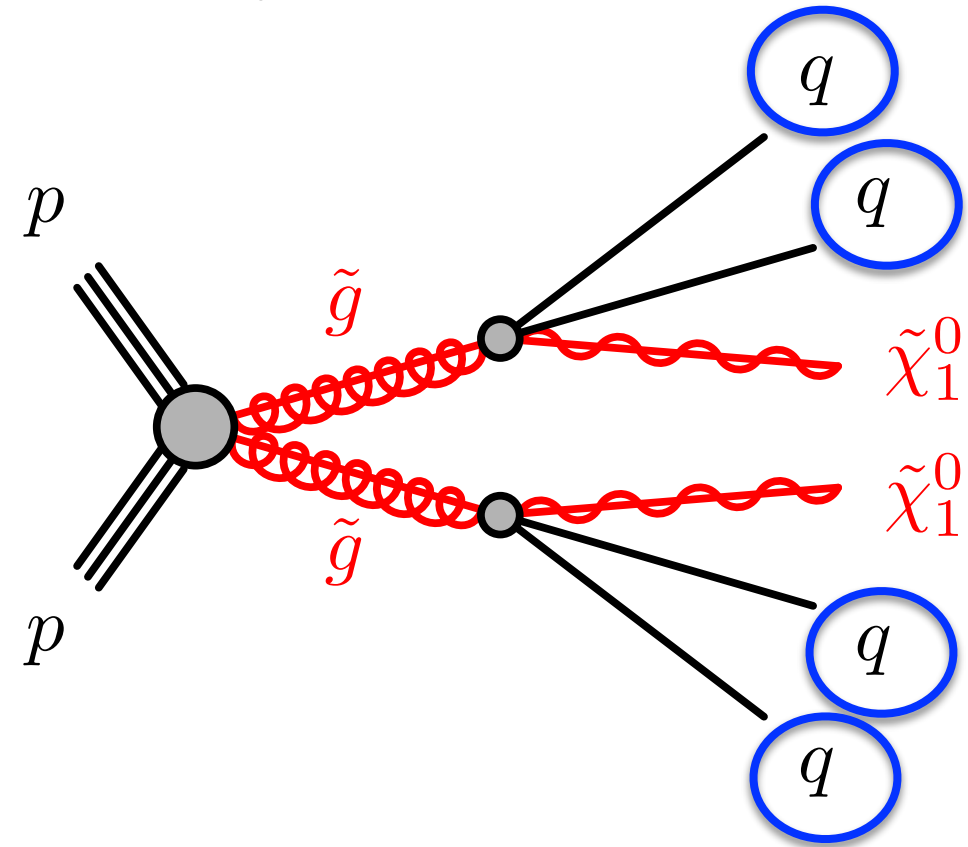
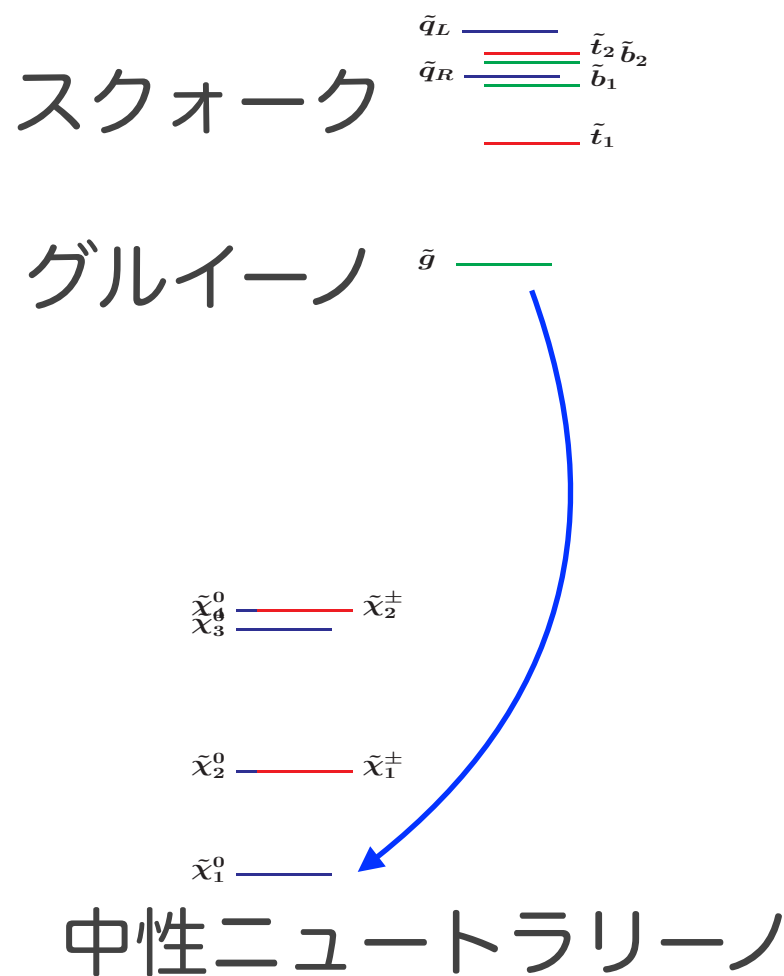
LHCは高エネルギー(“グルイーノコライダー”)なので、左の断面積が高い

超対称性粒子探索

といっても、たくさんの解析がある (Run2だけで今のところ54個の解析結果)

- SUSY粒子の質量階層はモデルにより様々
- 大きな消失横運動量という条件だけだと背景事象が多すぎるので、探索するチャンネルに応じて追加の条件をつける。

例えば: 元田中研宇野くんのチャンネル



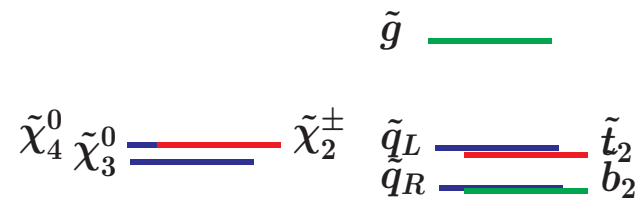
グルイーノが重いので、高エネルギーのジェットが複数でる。

超対称性粒子探索

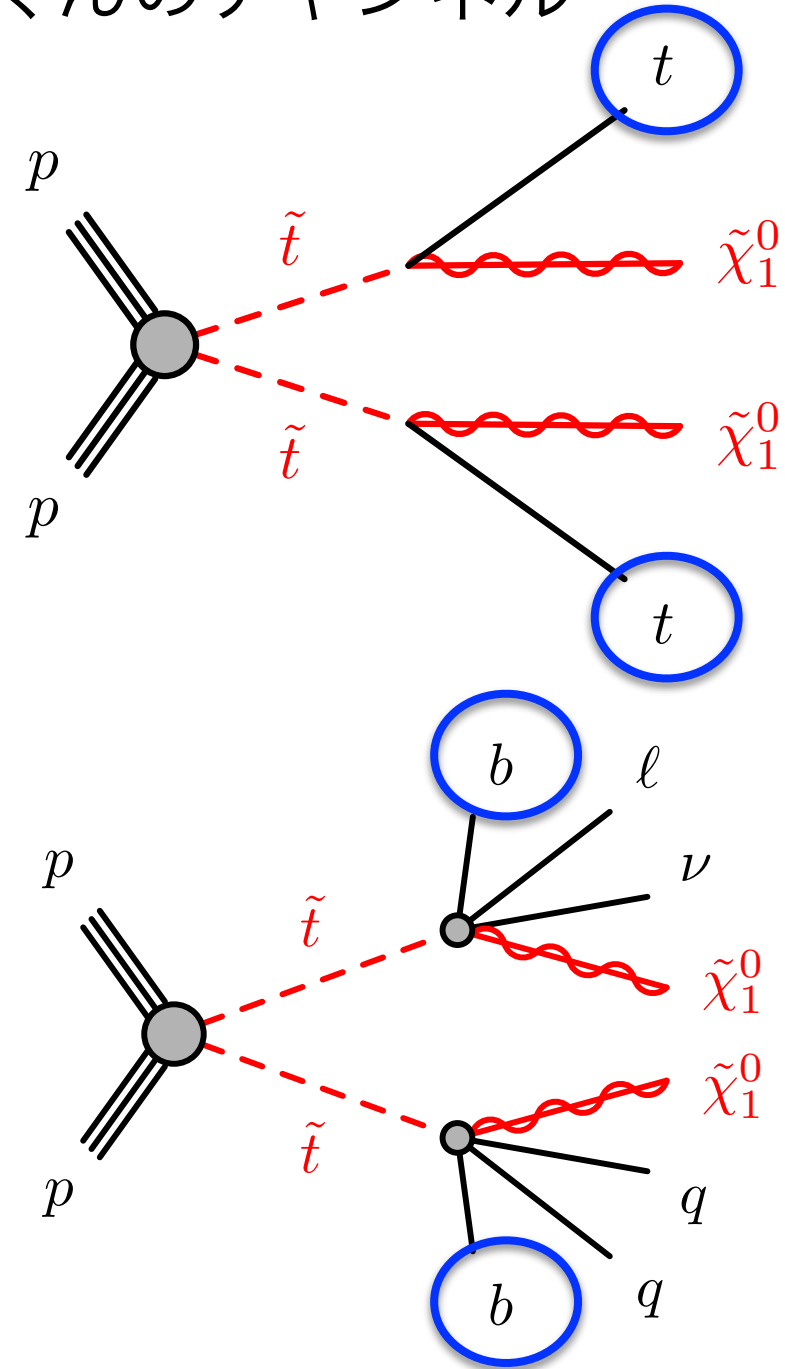
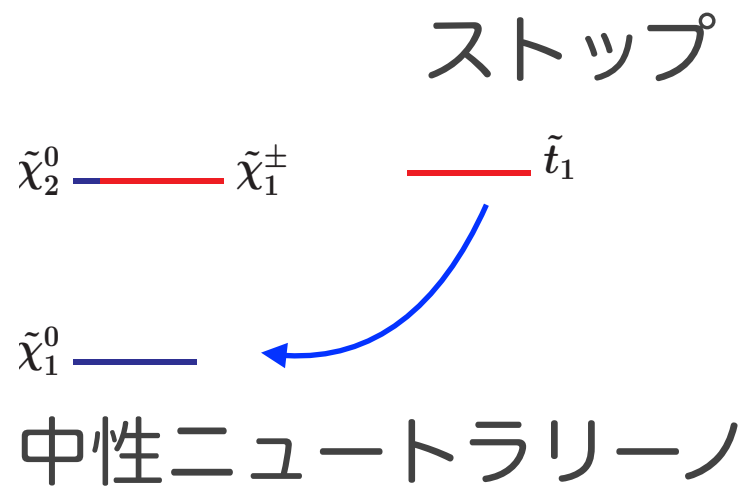
例をもう一つ: 元田中研山崎くん、田中研楊くんのチャンネル

軽いスカラートップ(ストップ)を探索

グリーノ



他のスクォーク \tilde{b}_1



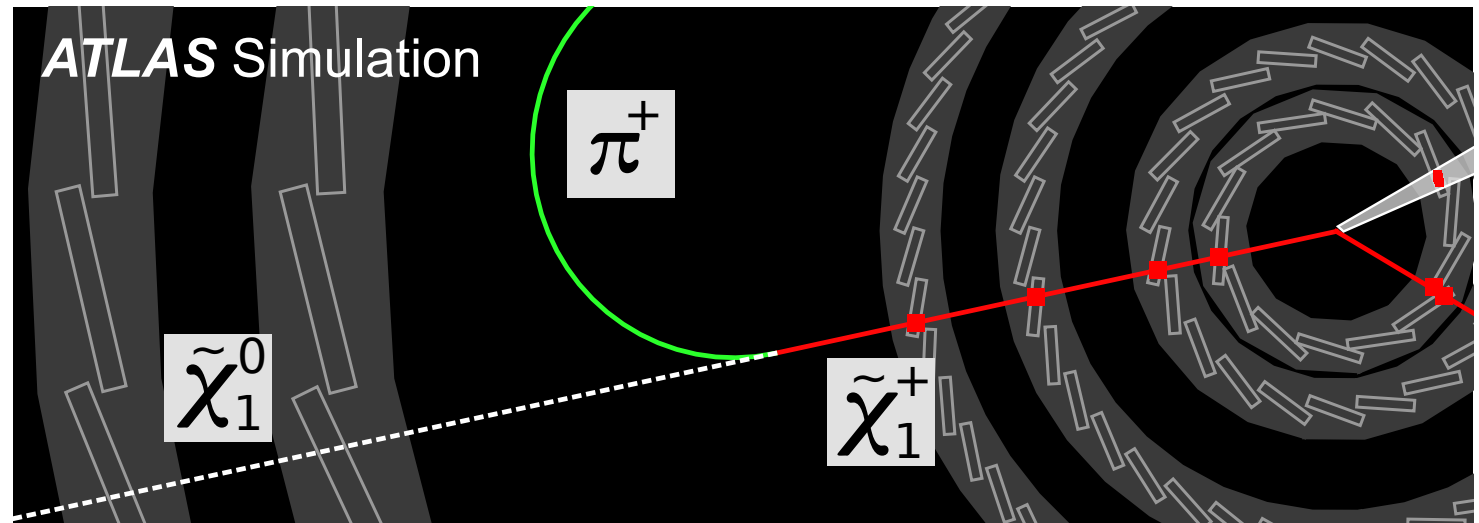
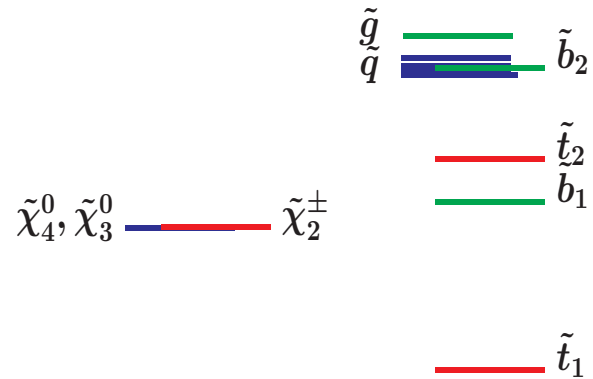
トップクォークやボトムクォーク由来のジェット (+レプトン)

長寿命ウィーノ探索

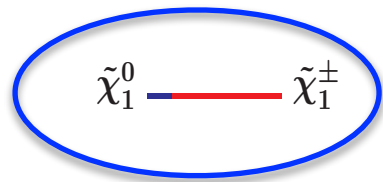
消失飛跡探索

元浅井研齊藤くんのチャンネル

AMSB SUSY

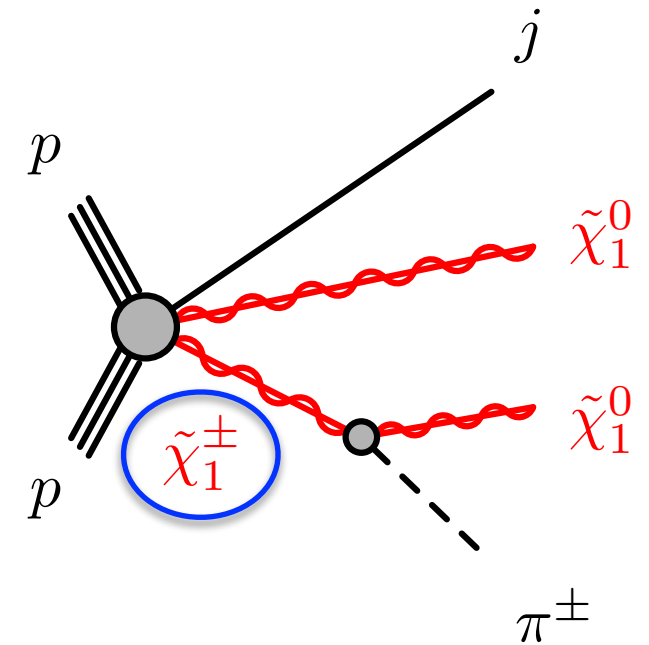


$\tilde{\chi}_2^0$ —



チャージーノ
ニュートラリーノ

ウィーノがダークマターの場合、荷電ウィーノとの質量差が小さくなって、荷電ウィーノが長寿命 (0.2 ns)。



- ・ ダークマター粒子の直接生成
- ・ 新粒子を直接検出器で見る特別な解析。

Run2の中間結果で460 GeVよりも重いことがわかった。

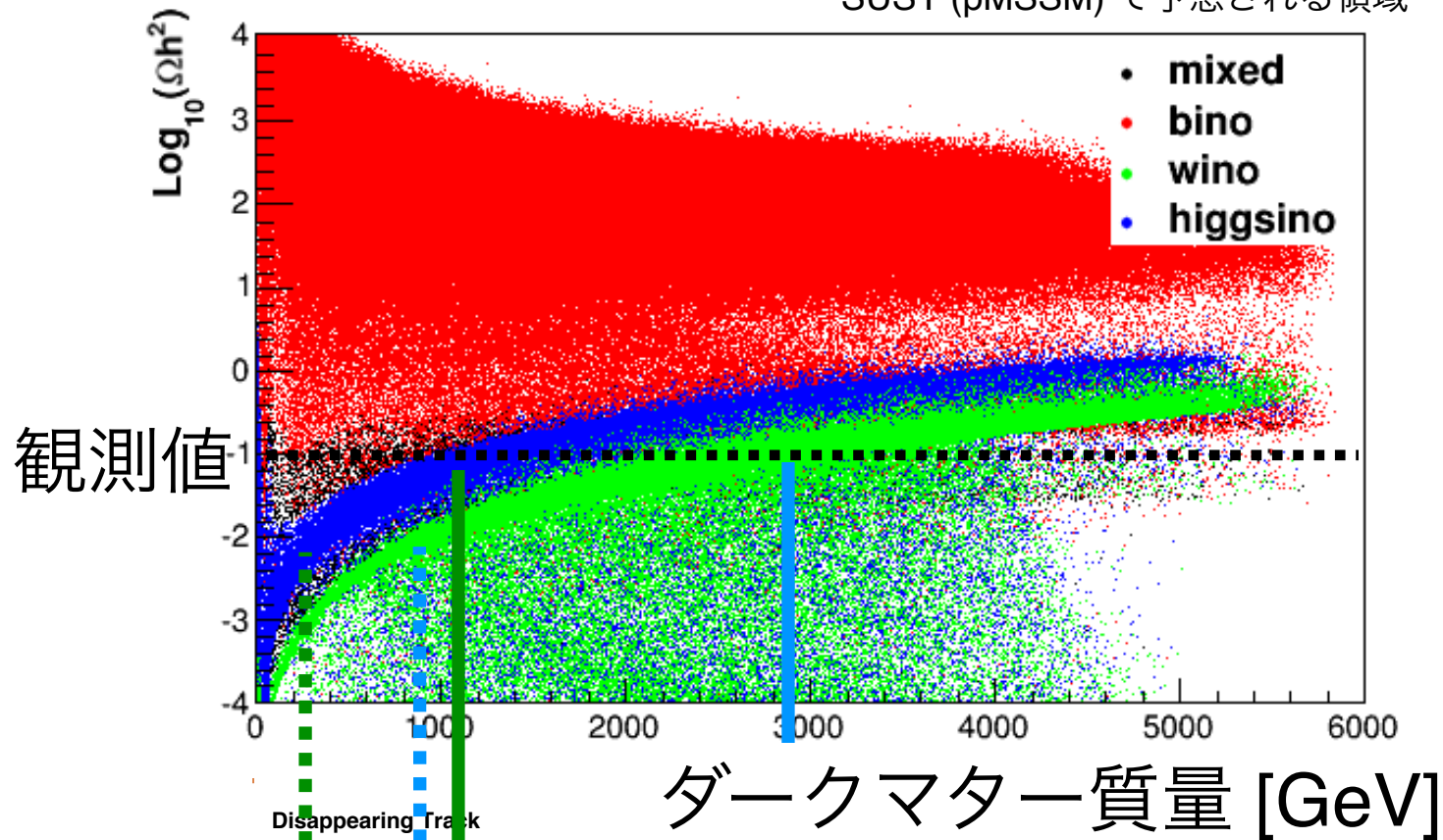
全データを解析中

ダークマターを発見できるか？

将来円形加速器構想 (FCC)

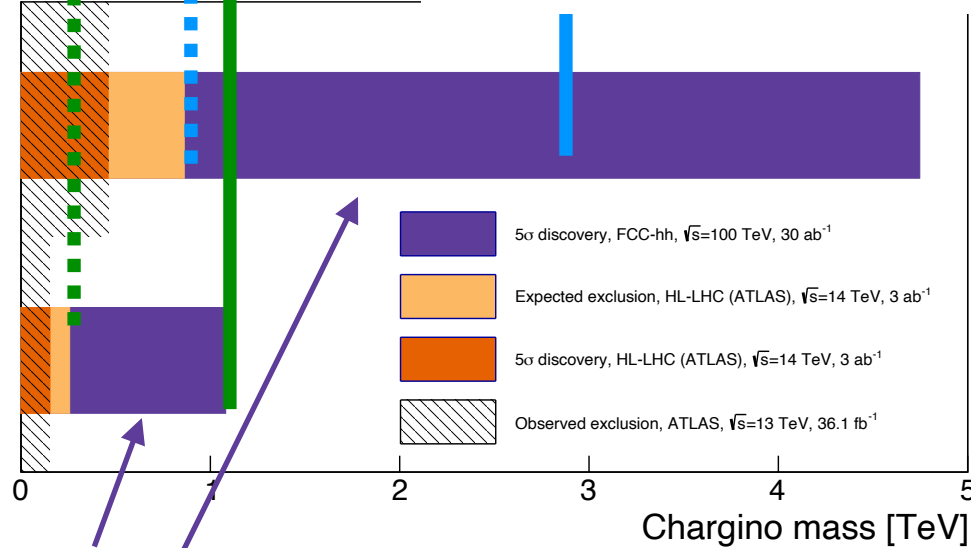
ダークマター残存量

SUSY (pMSSM) で予想される領域



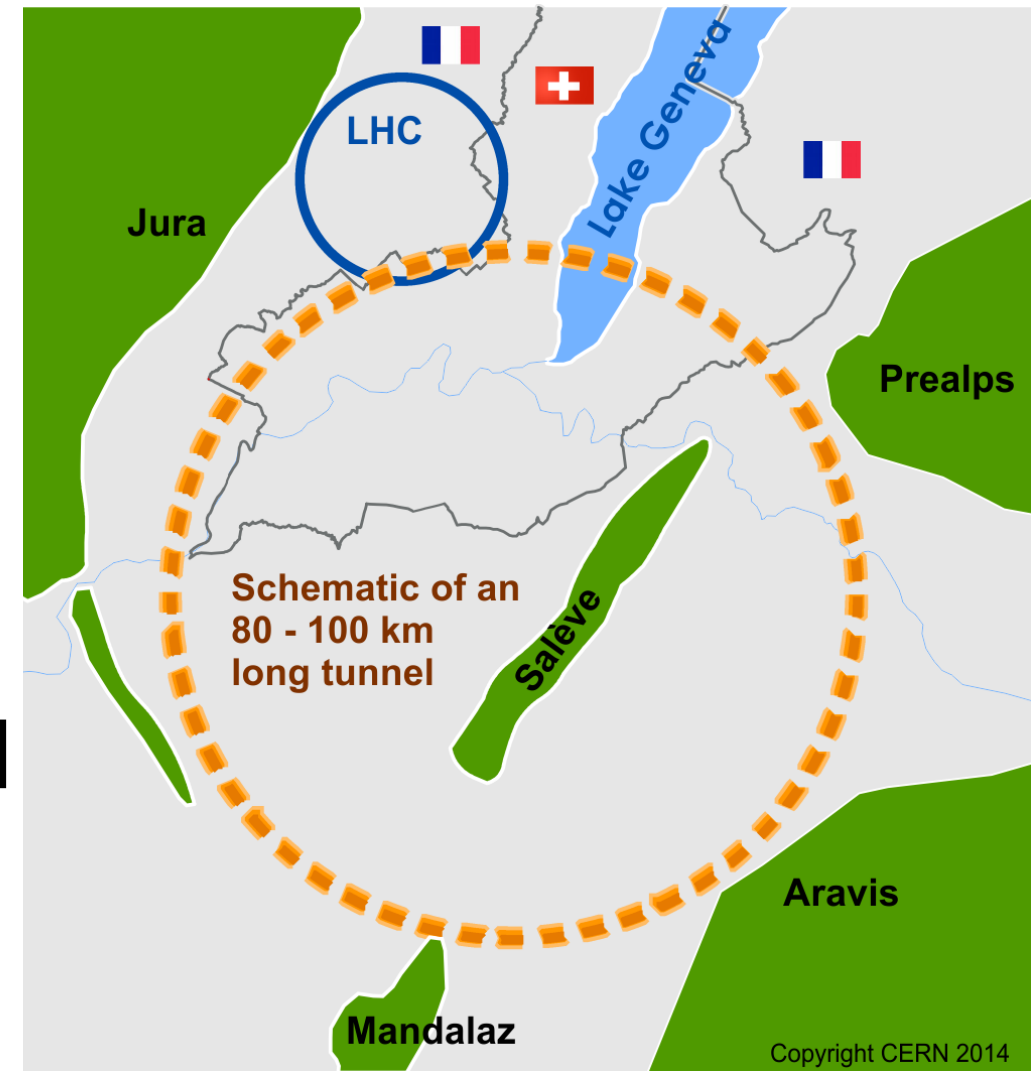
ウィーノ

ヒッグシーノ



FCCでの感度

ICEPPも参加



WIMPダークマターは確実に発見できる

先週公開されたばかりの最新結果(元浅井研究室の齊藤くんが解析)

今やるべきこと

FCCはまだ先の話なので、まずはLHC, HL-LHCで頑張る。

まだLHC/HL-LHC計画全体の5%しかデータを取っていない

→ 大きな改善が期待できるのが解析。

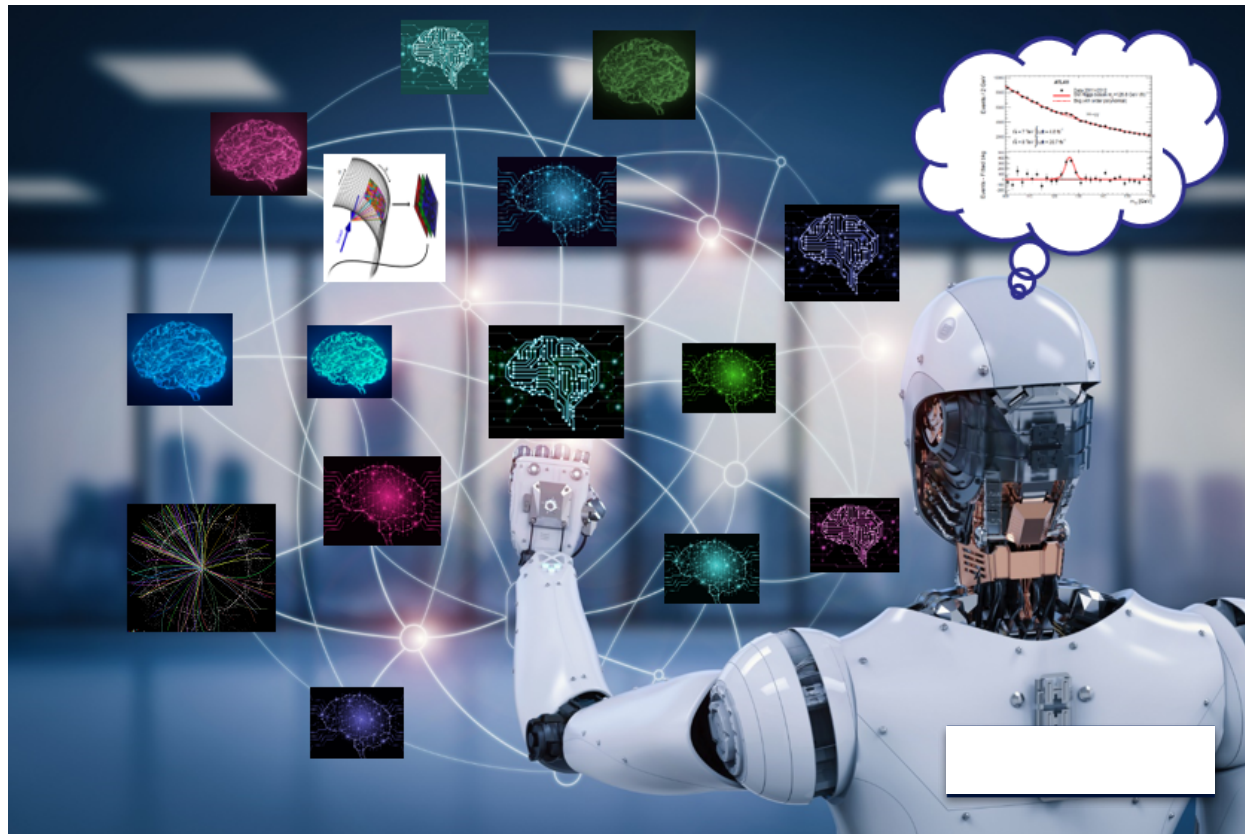
残りの時間は、最新のICT技術を物理解析に生かすという話をします。

- 機械学習 (深層学習を含む)
- 量子コンピュータ

機械学習って何？

機械学習自体はずっと昔からある (例: ニューラルネットワーク) が近年の発展が著しい。

- 計算機の発展 (CPU, GPU, FPGA, 機械学習用プロセッサ...)
- 深層学習 (任意の関数の表現が可能)
- 様々なアルゴリズム (boosting, convolution, auto-encoder, recurrent, weak supervision...)
- 専門家ではなくても簡単に使えるパッケージ (keras, PyTorch...)



ATLASでも様々な応用しています。

ATLASでの機械学習

何に使えるの？

- 分類



信号事象(Higgs, 超対称性粒子)と背景事象の分類

- 回帰 (値の推定)



粒子ID (クォークのフレーバー、ボソンタグ)

消失横運動量の再構成

- シミュレーション



検出器シミュレーション



さらには、人間が予想もできない新現象の発見も可能？

ヒッグス(等)の探索: 10cm-1mぐらいの大きさの新しいお城をさがそう。

予想もしない新粒子: 10cm-1mぐらいの新しいおもちゃを探そう。

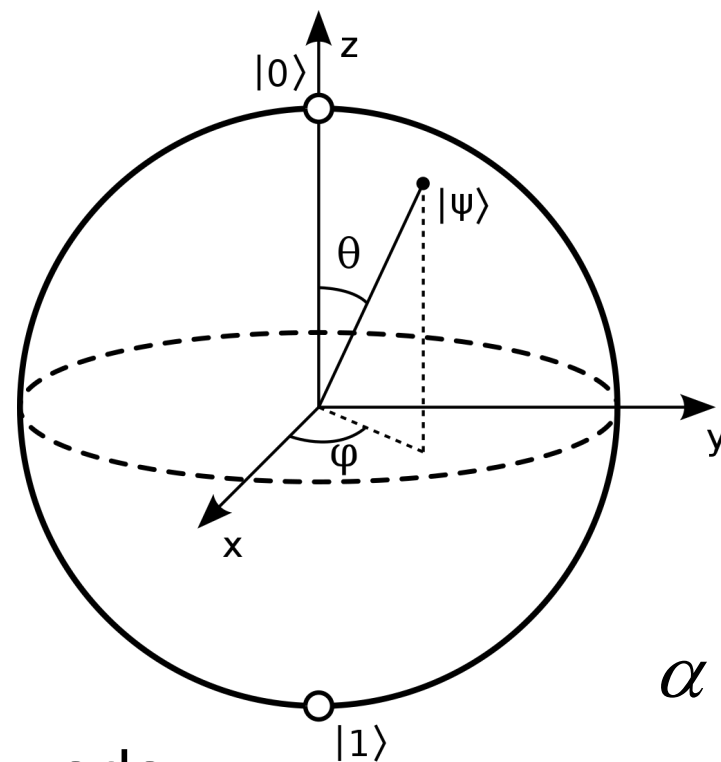
量子コンピュータって何？

普通のコンピュータ: データを0か1で保持 → ビット

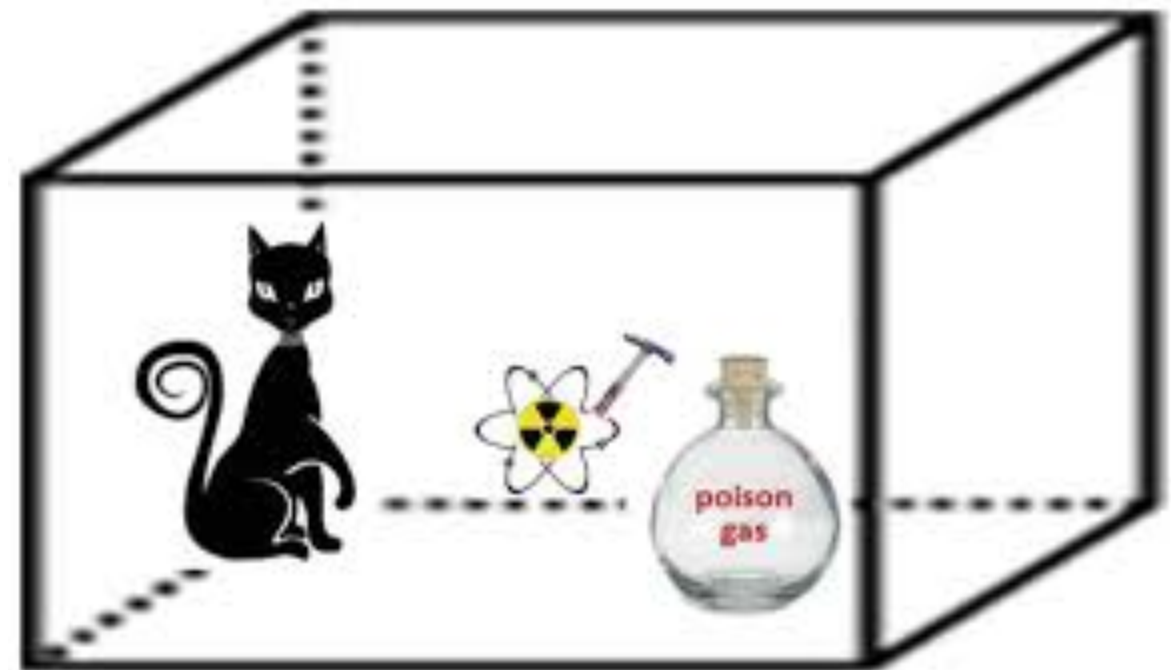
量子コンピュータ:

- 情報の単位が0と1の重ね合わせ状態の**キュービット**
 - 各キュービットが電子のスピンのように、連続的な2自由度の確率分布を持つ。
 - ビット同士が量子もつれ状態を作れる。
- 古典的な計算結果は測定によって決まる (シュレディンガーの猫)

シュレディンガーの猫



$$\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$



量子コンピュータの始まり



Physics of Computation Conference Endicott House MIT May 6-8, 1981

1 Freeman Dyson
2 Gregory Chaitin
3 James Crutchfield
4 Norman Packard
5 Panos Ligomenides
6 Jerome Rothstein
7 Gad Hewitt
8 Norman Hardy
9 Edward Fredkin
10 Tom Toffoli
11 Rolf Landauer
12 John Wheeler

13 Frederick Kantor
14 David Leinweber
15 Konrad Zuse
16 Bernard Ziegler
17 Carl Adam Petri
18 Anatol Holt
19 Roland Vollmar
20 Hans Beemerman
21 Donald Greenspan
22 Markus Boettiker
23 Otto Foberth
24 Robert Lewis

25 Robert Suaya
26 Stan Kugel
27 Bill Gosper
28 Lutz Preise
29 Madhu Gupta
30 Paul Benioff
31 Hans Moravec
32 Ian Richards
33 Maran Pour-El
34 Danny Hillis
35 Arthur Burks
36 John Cocke

37 George Michael
38 Richard Feynman
39 Laurie Lingham
40 Thirugarajan
41 ?
42 Gerard Vichniac
43 Leonid Levin
44 Lev Levitin
45 Peter Gacs
46 Dan Greenberger

量子コンピュータの始まり

International Journal of Theoretical Physics, Vol. 21, Nos. 6/7, 1982

Simulating Physics with Computers

Richard P. Feynman

Department of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91107

Received May 7, 1981

Can a quantum system be probabilistically simulated by a classical (probabilistic, I'd assume) universal computer?

the answer is certainly, No!

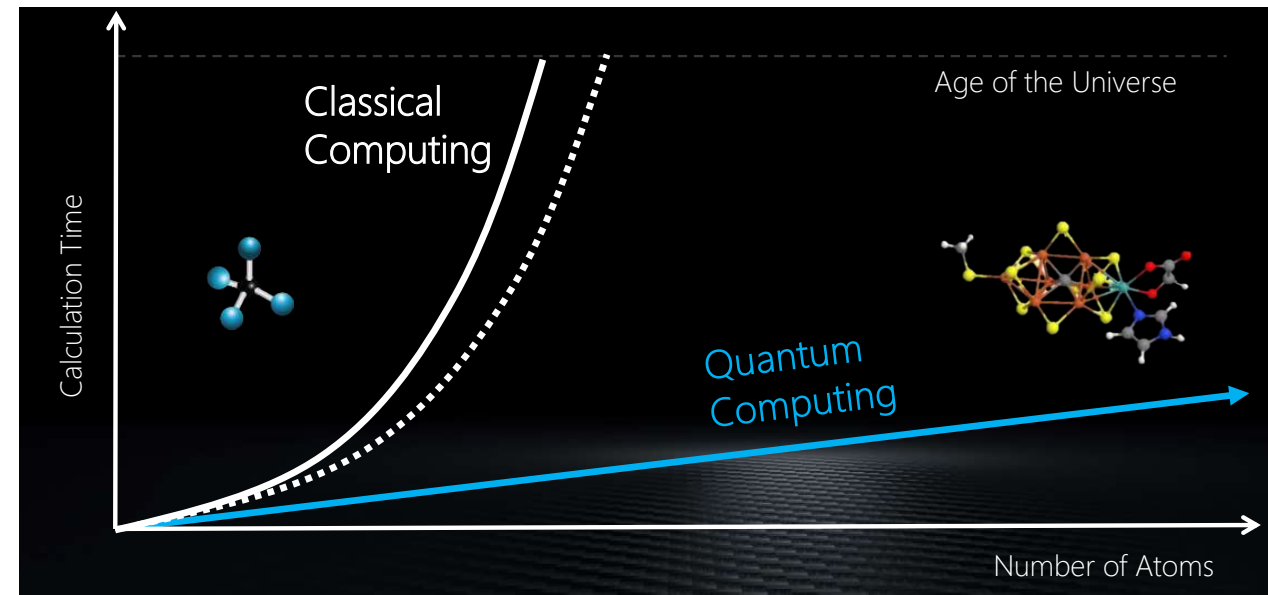
“Let the computer itself be built of quantum mechanical elements which obey quantum mechanical laws.”

量子コンピュータ

http://www.int.washington.edu/talks/WorkShops/int_17_66W/People/Wecker_D/Wecker.pdf より引用

昨年10月にGoogleがNature誌で、「量子超越性」を達成したと発表。

- Google: 「世界最速のスーパーコンピューターでも1万年かかるとされる処理を、Googleの量子コンピューターは200秒で実行した」
- IBM: 「スパコンなら最長でも2日半で計算できる」



(様々な課題はあるが)
量子コンピューターは計算能力の飛躍的な発展 (ひいては文明の転換)につながる可能性がある。

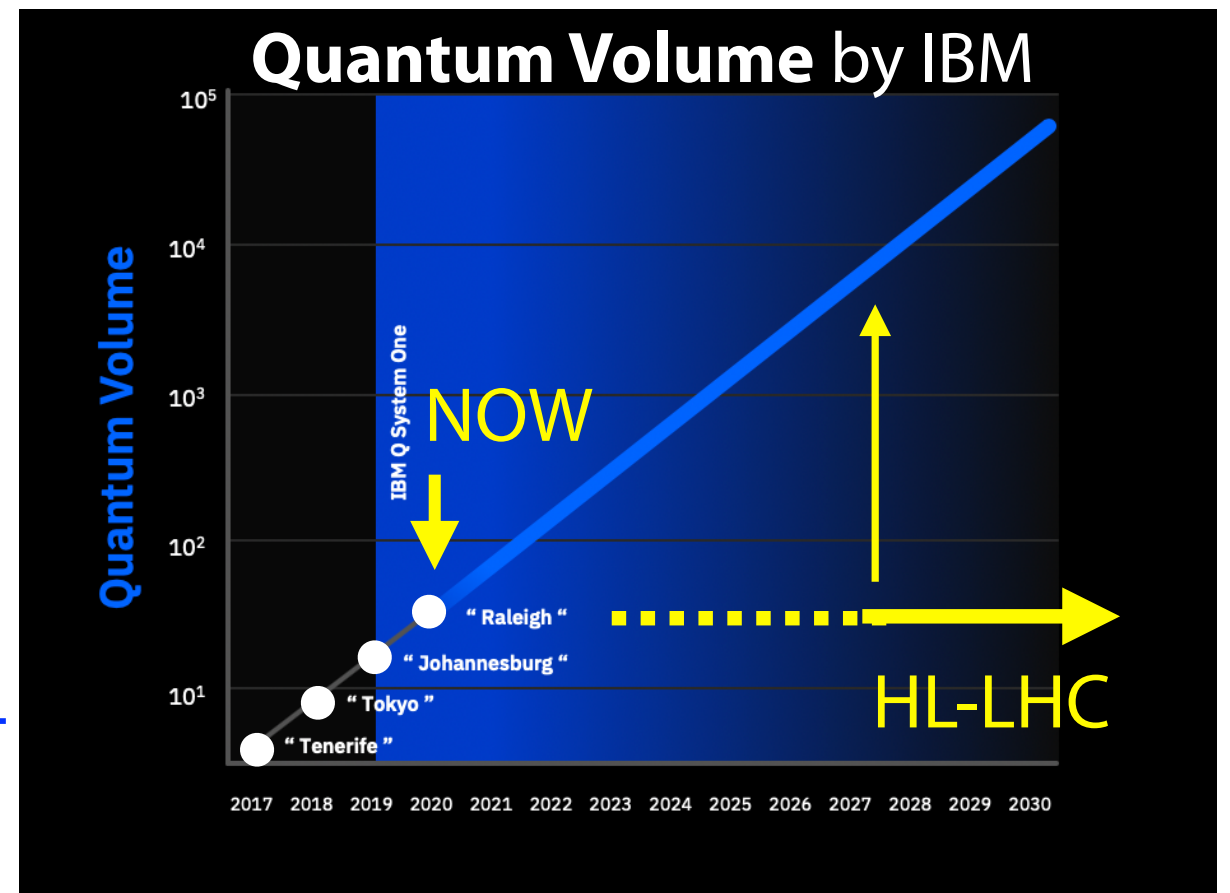
1000

100

10

1

of qubits

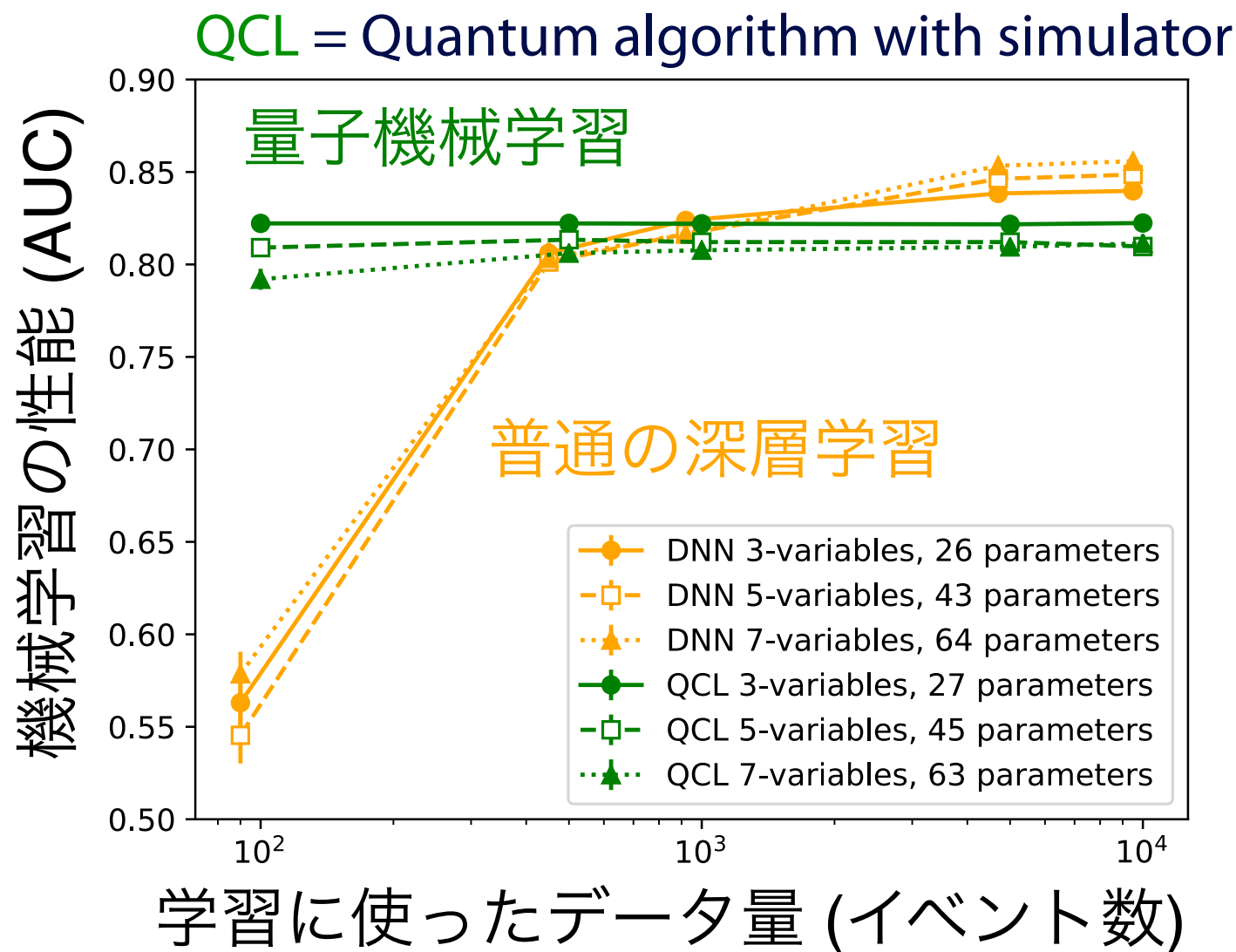
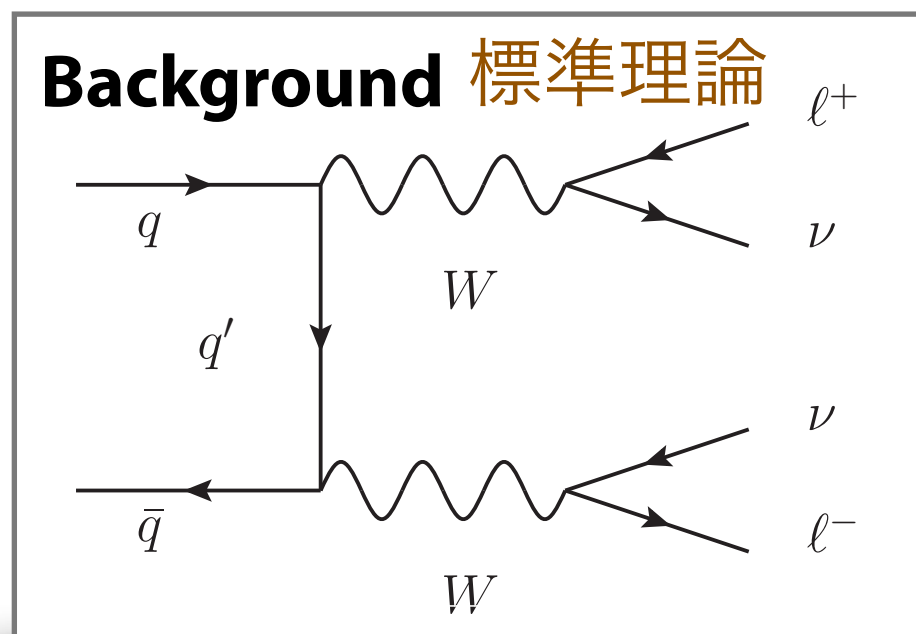
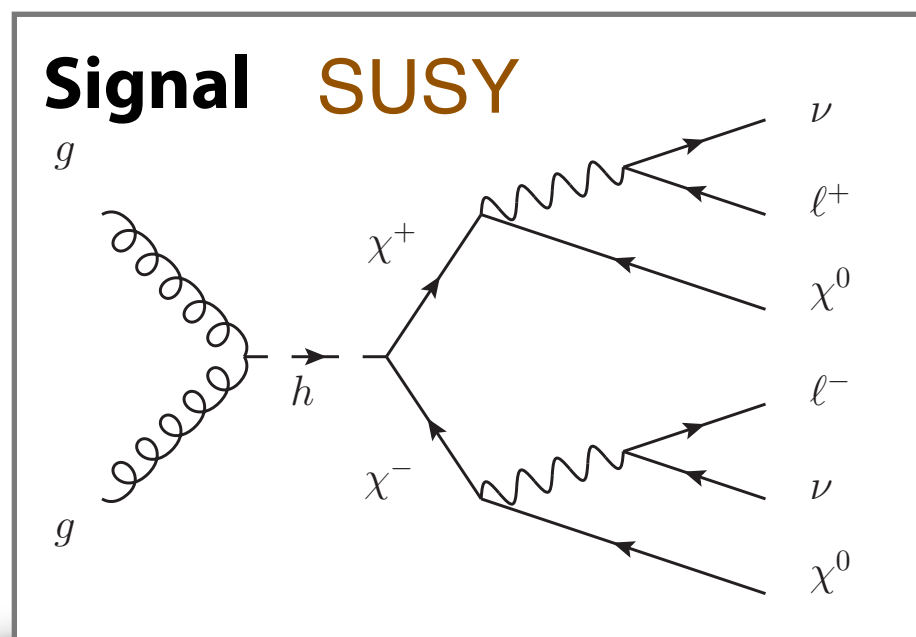


量子コンピュータ応用の可能性

ICEPPによる研究例:

量子機械学習でSUSYを探索 (シミュレーション)

arXiv:2002.09935

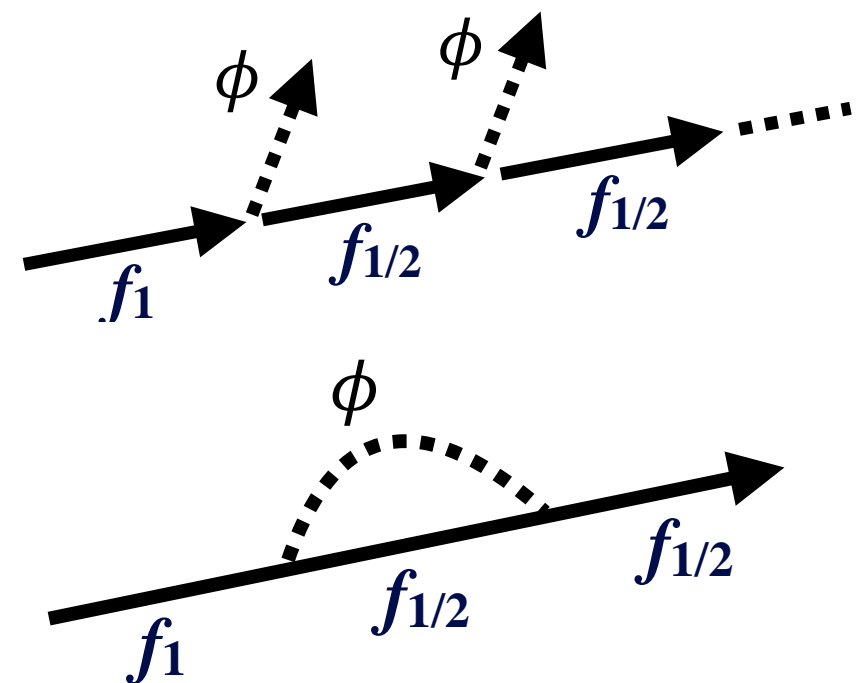
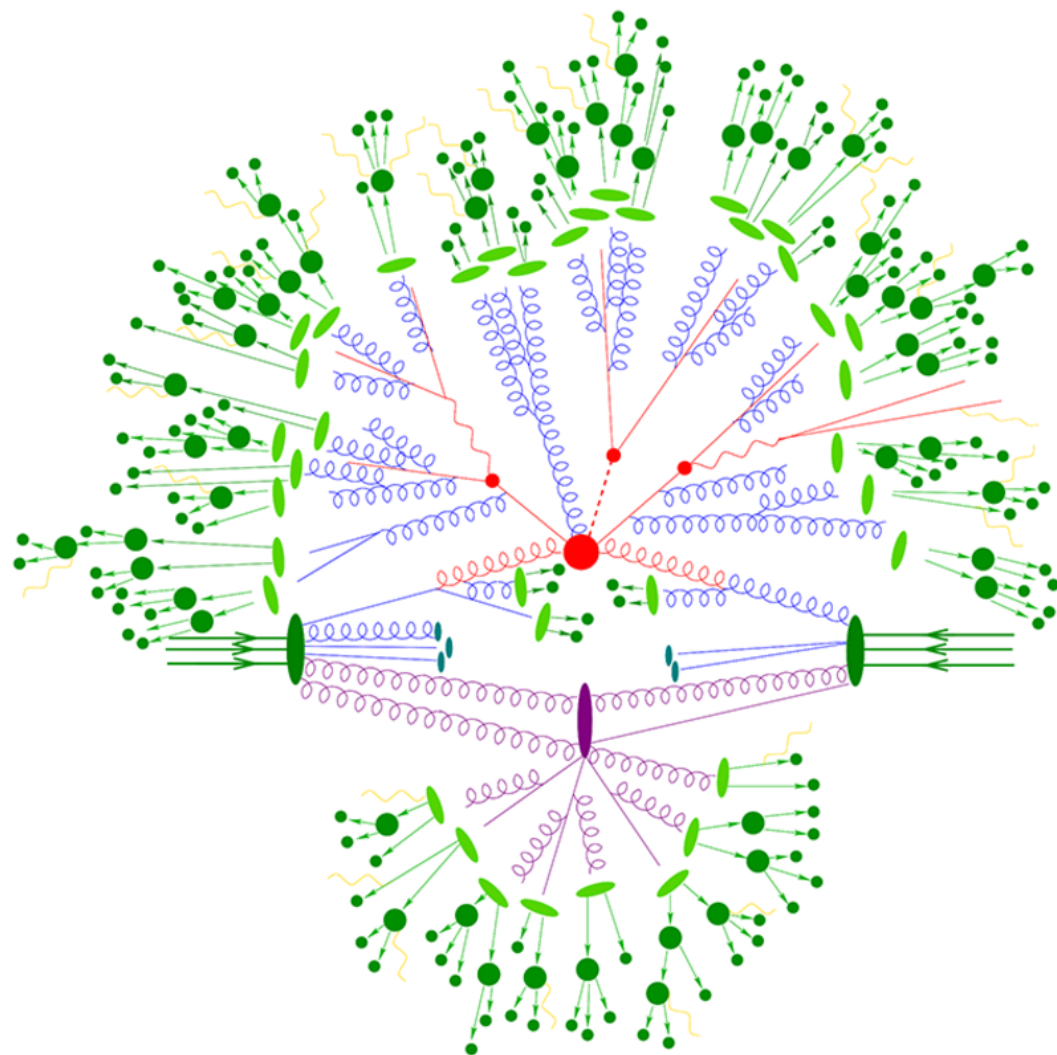


量子機械学習は、より少ないデータで学べる？

量子コンピュータ応用の可能性

素粒子反応のシミュレーション

arXiv:1904.03196



単純化 (ボソン一種類、フェルミオン2種類) したシミュレーションを量子回路として実装。

今後は、現実(=標準理論)により近いモデルを実装していく。

ファインマンが考えた

「物理」をシミュレートするコンピュータの実現へ。

LHC-ATLAS実験をやりたい人は

- 以下の五名の名前で出願してください。



東京大学
素粒子物理国際研究センター
International Center for Elementary Particle Physics
The University of Tokyo

ATLAS
http://atlas.cern.ch

学部生向け特別セミナー

最先端「加速器素粒子実験」を知ろう！

CERN における国際協力加速器実験 **LHC-ATLAS 実験** の
スペシャリストである教員による連続特別セミナー&座談会

素粒子物理、物理実験の面白さ・難しさ、加速器実験、ビッグサイエンス、計測技術、
高速データ処理回路、データ解析、計算機科学、機械学習、量子コンピューティング等
の**ホットピック**を最前線で活躍する研究者から直接聞けるチャンスです。

学部生・大学院生・学内外問わず大歓迎

事前登録が必要です。素粒子物理国際センターのウェブページより詳細をご確認ください。
<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

日時：6月8日(月)、6月12日(金) 5限目 (16:50-18:35)
場所：オンラインでの開催となります。事前登録により接続方法の情報をお知らせします。

内容：

6月8日	「ヒッグス粒子の物理」 「超対称性粒子と暗黒物質」	田中純一 (素粒子物理国際研究センター・教授) 澤田龍 (素粒子物理国際研究センター・准教授)
6月12日	「加速器・検出器の最先端技術」 「LHC で探る余剰次元」	石野雅也 (素粒子物理国際研究センター・教授) 奥村恭幸 (素粒子物理国際研究センター・准教授)

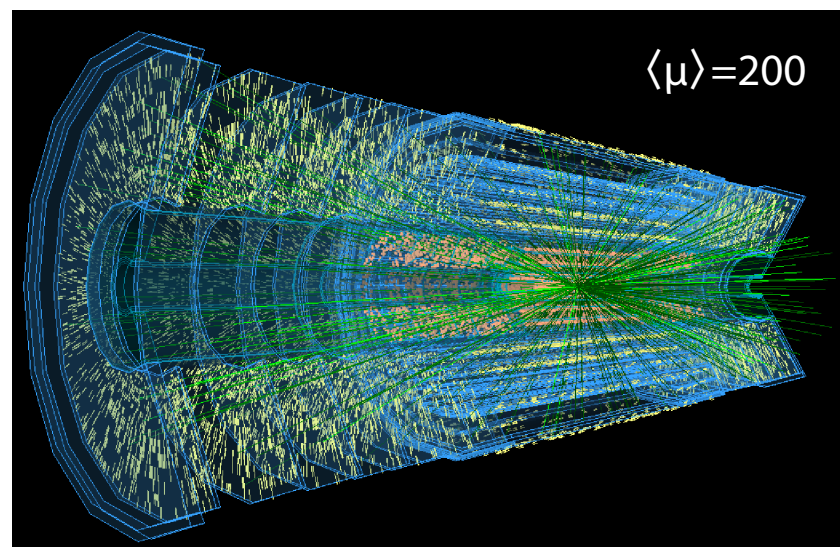
各研究室の情報は

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/graduate>

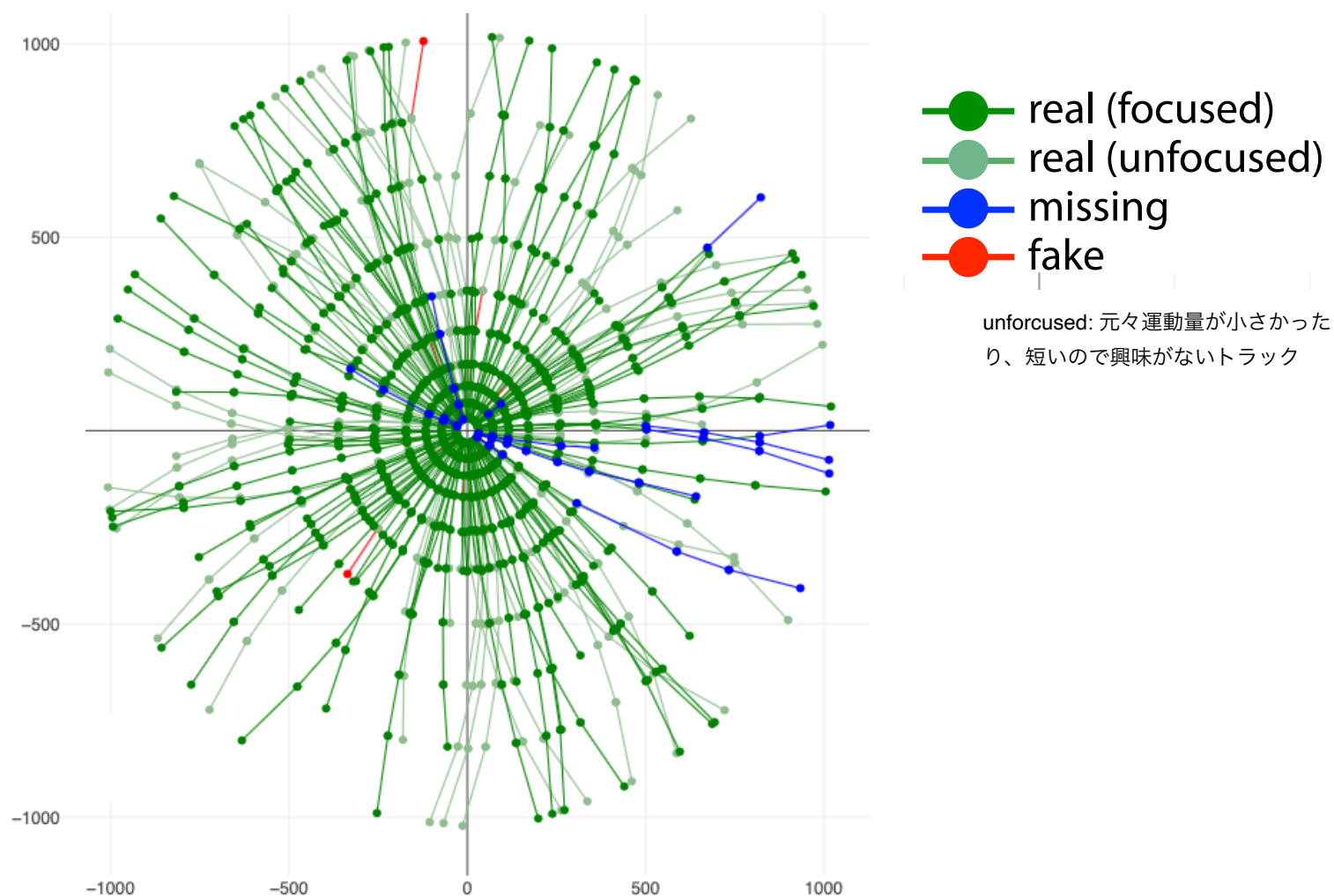
バックアップ

量子コンピュータ応用の可能性

粒子飛跡再構成



1600粒子 (11000ヒット) のシミュレーションデータで、実際に量子コンピュータ(D-Wave)を使って飛跡再構成。



HL-LHCでは同時に同時に衝突する陽子対が今の~4倍
→ ヒットの組み合わせ (計算時間) は指数関数的に増大。

97%の効率で再構成に成功(緑)。

偽トラック(青)の混入は1.5%と低い。

寺師先生のスライドより引用